

**Titre:** Planification de réseaux hyperconnectés et mutualisés de transport urbain de marchandises  
Title:

**Auteur:** Lilia Jemai  
Author:

**Date:** 2018

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Jemai, L. (2018). Planification de réseaux hyperconnectés et mutualisés de transport urbain de marchandises [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/3253/>  
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/3253/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Michel Gendreau, & Teodor Gabriel Crainic  
Advisors:

**Programme:** Maîtrise recherche en génie industriel  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PLANIFICATION DE RÉSEAUX HYPERCONNECTÉS ET MUTUALISÉS DE  
TRANSPORT URBAIN DE MARCHANDISES

LILIA JEMAI

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE INDUSTRIEL)  
AOÛT 2018

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

PLANIFICATION DE RÉSEAUX HYPERCONNECTÉS ET MUTUALISÉS DE  
TRANSPORT URBAIN DE MARCHANDISES

présenté par: JEMAI Lilia

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. TRÉPANIER Martin, Ph. D., président

M. GENDREAU Michel, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. CRAINIC Teodor Gabriel, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

Mme LAHRICHI Nadia, Ph. D., membre

## DÉDICACE

*À mes chers parents Abdellaziz et Najoua, mes idoles  
Qui m'ont soutenu depuis mes premiers pas  
Nulle dédicace ne saurait exprimer ce que je vous dois  
Vous êtes la source de mes joies, le secret de ma force  
Je ne vous remercierai jamais assez pour votre amour, soutien et courage...*

*À mon cher mari Walid,  
Pour ton soutien, tes sacrifices, ta bienveillance et ton affection  
Merci pour tout...*

*Pour mon fils, mon petit coeur Aziz,  
Que Dieu tout puissant te préserve et te procure santé et longue vie  
Tu embellis ma vie...*

*À mes petits amours, mon frère Mohamed et ma sœur Sarra,  
Je vous souhaite un avenir plein de bonheur, de réussite et de sérénité...*

*À toute ma famille,  
À mes amis,  
Mes professeurs,  
Je vous dédie ce modeste travail...*

## REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le fruit d'un travail qui n'aurait pu être possible sans l'aide de personnes-clés qui m'ont soutenue durant les dernières années. Je désire leur adresser mes plus sincères remerciements. Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur "**Michel Gendreau**", en tant que Directeur de recherche, pour son encadrement et sa disponibilité tout au long du travail de recherche ainsi qu'au cours de la rédaction de ce mémoire. Mes remerciements s'adressent également à mon codirecteur, Monsieur "**Teodor Gabriel Crainc**", qui a su me conseiller et me guider à travers toutes les épreuves de mon parcours, aussi, pour son encadrement, sa disponibilité et tout le soutien offert m'ont permis de mener à terme ce projet d'envergure. J'exprime ma gratitude à toute l'équipe du centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprises, la logistique et le transport (**CIRRELT**), qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail de recherche. Finalement, je tiens à remercier ma famille, mes amis, pour leur écoute, leur support moral, leurs corrections ainsi que leurs nombreux encouragements pendant ces dernières années.

## RÉSUMÉ

Les secteurs de la logistique et du transport jouent un rôle essentiel dans les économies modernes, puisqu'ils représentent les différentes possibilités d'amélioration de la compétitivité des pays et ils imposent d'importants défis sociaux et environnementaux. En 2015, les coûts de logistique et de transport ont représenté respectivement 7,85% et 10% des PIB des États-Unis et de l'Union européenne. Pour la même année, ces industries ont contribué pour 5,5% aux émissions mondiales de GES ([Crainic et Montreuil, 2016] ; [Fontaine *et al.*, 2017]). Ces résultats découlent des nouvelles tendances du marché et de l'émergence des exigences (urbanisation, commerce électronique, etc.) et des systèmes logistiques et de transport de nature « complexe » (par exemple, plusieurs acteurs ayant différents objectifs, incertitudes, etc.). Pour faire face aux problèmes mentionnés, les réorganisations des systèmes logistiques et du transport actuels doivent encore être étudiées, planifiées, testées et évaluées. Au cours des dernières années, les cadres théoriques de la logistique urbaine (CL) et de l'Internet Physique (PI) ont pris de l'ampleur dans le monde de la recherche scientifique.

L'objectif principal de la Logistique Urbaine est de réduire les impacts négatifs des mouvements de véhicules de fret en termes de congestion, de mobilité et d'impacts environnementaux, sans pénaliser les différentes activités sociales et économiques ([Taniguchi et Thompson, 2002] ; [Taniguchi, 2014]). Plus précisément, il vise, tout d'abord, à réduire et contrôler la présence de véhicules de fret dans les zones urbaines. Deuxièmement, améliorer l'efficacité des mouvements de marchandises et réduire les impacts sur l'environnement, notamment en minimisant le trafic à vide des véhicules de fret sur les routes urbaines ([Benjelloun et Crainic, 2008] ; [Dablanc, 2007]).

L'Internet Physique (PI) est un nouveau concept de transport de marchandises et de logistique visant à améliorer l'efficacité économique, environnementale et sociale et la durabilité de la manière dont les objets physiques sont déplacés, stockés, réalisés, fournis et utilisés dans le monde entier ([Montreuil *et al.*, 2013] ; [Montreuil *et al.*, 2012]). Utilisant les mêmes concepts de l'Internet Numérique et de la même manière que les paquets de données transitent dans les réseaux Internet numériques, l'idée de PI est d'acheminer les marchandises encapsulées dans des conteneurs modulaires via un réseau global, interconnecté et ouvert ([Montreuil, 2009] ; [Sarraj *et al.*, 2012]). Le concept de PI est de plus en plus présent dans la recherche et les applications récentes qui ont démontré de vrais gains potentiels dans le transport de marchandises interurbain, les chaînes d'approvisionnement et la logistique ([Ballot *et al.*, 2014] ; [Sarraj *et al.*, 2014]).

Plusieurs concepts tels que la coopération, la consolidation, la manière de mettre en œuvre les activités de transport et de stockage de marchandises, sont des concepts-clés à la fois pour la logistique urbaine et l'Internet physique. Ces systèmes de transport sont complémentaires, puisque la logistique urbaine fournit les derniers segments de la logistique interconnectée et des réseaux de transport Internet physique. Malgré l'importance de ces concepts, [Crainic et Montreuil, 2016] ont affirmé qu'aucune étude n'avait exploré les liens et les synergies entre ces systèmes avancés de transport de marchandises et de logistique. De plus, à notre connaissance, aucune méthode de planification, de modélisation ou d'optimisation n'a été développée pour ce type de réseaux hyperconnectés.

On vise à combler ces lacunes en introduisant l'idée des systèmes de la Logistique Urbaine Hyperconnectée et Mutualisée (HCL) "*Hyperconnected City Logistics (HCL)*". On discute des concepts-clés, des avantages potentiels et des défis en termes de recherches et de développements de la logistique urbaine hyperconnectée. Notre principal problème de recherche est le développement des modèles d'optimisation afin de mettre en place une planification d'un réseau HCL. On évalue les avantages et les enjeux de l'introduction du concept de coopération entre de nombreux acteurs logistiques, en particulier dans le cadre du partage des ressources dans un système de la logistique urbaine hyperconnectée.

Dans ce mémoire, on propose des décisions tactiques liées à la conception et à la gestion du réseau de services. Dans notre modèle, on modélise les différents types de ressources, comme la taille des flottes et la capacité des satellites et des centres de distribution. De plus, notre modèle est multimodal puisqu'on considère plusieurs modes de transport comme les camions et les trams. On introduit, également, les concepts de coopération et de partage des ressources à la formulation classique de problème de conception de réseaux. Ce problème consiste à satisfaire la demande, tout en respectant les contraintes et les exigences de la mutualisation et du système HCL. L'objectif vise à minimiser les coûts de sélection et d'exploitation d'un service et les coûts d'affectations de la coalition considérée. Enfin, on effectue une série d'expériences numériques afin d'évaluer, d'une part, la performance du modèle et de l'approche proposée et, d'autre part, l'impact de l'adaptation de l'approche mutualisée et la multimodalité dans les modèles de planification tactique proposés dans le cadre d'un réseau HCL mutualisé. On a conclu que l'approche mutualisée et la multimodalité donnent plus de flexibilité et de meilleurs résultats pour les réseaux HCL. Les solutions obtenues ont validé les modèles de planification et les hypothèses proposés.

## ABSTRACT

Transport and logistics become increasingly important in the development, organization and operation of our society. Recently, the intensity of logistic activities has grown strongly in terms of volume since most of our activities require the movement of people and goods, that must be efficient and at minimum cost. However, these requirements can only be achieved with efficient infrastructure, services and logistics and transport activities. More specifically, the transportation of goods is an important factor for most economic and social activities in urban life [OECD, 2003]. In fact, the transport of goods in the city constitutes from 15% to 20% of all vehicle trips. This complexity is amplified by the increase of population and urbanization. In 2014, 54% of the world's population was living in urban areas. The [Unies, 2004] are expecting a raise of 66% until 2050 and 85% until 2100 [OECD, 2003]. It results an increase in, both, demands and complexity of the distribution networks have increased. Therefore, transportation industry becomes a source of various kinds of nuisances such as: noise, congestion, pollution, etc.

In order to solve these problems, new paradigms have emerged, we are specifically interested in *City Logistics (CL) Physical Internet (PI)*. The main objective of Urban Logistics is to reduce negative impacts of freight vehicle movements in terms of congestion, mobility and environmental impacts, without penalizing the different social and economic activities ([Taniguchi et Thompson, 2002] ; [Taniguchi, 2014]). More specifically, it aims, first of all, to reduce and control the presence of freight vehicles in urban areas. Secondly, to improve the efficiency of goods movements and to reduce environmental impacts, especially by minimizing the empty traffic of freight vehicles in urban roads ([Benjelloun et Crainic, 2008] ; [Dablanc, 2007]).

The Physical Internet (PI), is a new concept for freight transportation and logistics aiming to improve the economic, environmental and social efficiency and sustainability of the manner that physical objects are moved, stored, realized, supplied and used around the world ([Montreuil *et al.*, 2013] ; [Montreuil *et al.*, 2012]). Using the same concepts of the Digital Internet and in the same way that data packets transit in digital Internet networks, the idea of PI is to route goods which are encapsulated in modular containers through a global, interconnected and open network ([Montreuil, 2009] ; [Sarraj *et al.*, 2012]). The concept of PI is increasingly present in research and recent applications that have demonstrated a real potential gains in interurbain freight transportation, supply chains, and logistics ([Ballot *et al.*, 2014] ; [Sarraj *et al.*, 2014]).



Several concepts such as cooperation, consolidation, the way of implementing the activities of transport and storage of goods, are key concepts for both City Logistics and Physical Internet. These transport systems are complementary, since City Logistics provides the final segments of interconnected logistics and Physical Internet transportation networks. Despite the importance of these concepts, [Crainic et Montreuil, 2016] have claimed that no study has explored the links and synergies between these advanced systems of freight transport and logistics. Moreover, to the best of our knowledge, no planning, modeling or optimization methods have been developed for this type of hyperconnected networks.

We aim to fill these gaps by introducing the Hyperconnected Urban Logistic Systems idea "Hyperconnected City Logistics (HCL)". We will discuss key concepts, potential benefits and challenges in term of research and development of the Hyperconnected City Logistics. Our main research problem is the development of optimization models in order to set up an hyperconnected urban network planning. We will propose tactical decisions related to the design and management of the hyperconnected service network. We evaluate how an Hyperconnected City Logistics system can be profitable when introducing the concept of cooperation between many logistic actors especially under the sharing of resources. Further, we model the resources, like fleet size and satellite capacity, in our model. We also consider in our problem setting not only trucks but also other transportation mode for example Trams. We, also, introduce a new Integer Programming formulation for the problem. This formulations benefits from the fact that, compared to classical network design formulations, we introduce cooperation and resources sharing.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE . . . . .	iii
REMERCIEMENTS . . . . .	iv
RÉSUMÉ . . . . .	v
ABSTRACT . . . . .	vii
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	ix
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	xii
LISTE DES FIGURES . . . . .	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS . . . . .	xiv
LISTE DES ANNEXES . . . . .	xv
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION . . . . .	1
CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE ET MISE EN CONTEXTE . . .	4
2.1 Le transport de marchandises . . . . .	4
2.1.1 Les niveaux de planification . . . . .	5
2.1.2 Les différents enjeux du transport de marchandises . . . . .	6
2.2 La logistique collaborative . . . . .	6
2.2.1 Définition de la logistique collaborative . . . . .	6
2.2.2 Les types de logistique collaborative . . . . .	7
2.2.3 La notion du partage . . . . .	8
2.2.4 La mutualisation logistique . . . . .	9
2.3 Le transport de marchandises en ville / La logistique urbaine . . . . .	10
2.3.1 Les installations . . . . .	12
2.3.2 Les niveaux dans la logistique urbaine . . . . .	13
2.3.3 Les problèmes de planification dans la logistique urbaine . . . . .	15
2.4 L'Internet Physique (PI) . . . . .	18
2.4.1 Définition et objectifs de l'Internet Physique (PI) . . . . .	19
2.4.2 Structure de PI . . . . .	20

2.4.3 Applications et perspectives . . . . .	23
2.5 Discussion . . . . .	24
2.6 Les objectifs de la recherche . . . . .	24
CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DU SYSTÈME DE LA LOGISTIQUE URBAINE HYPERCONNECTÉE (HCL) . . . . .	26
3.1 Introduction . . . . .	26
3.2 Les parties prenantes . . . . .	26
3.3 L'hyperconnexion dans un système HCL . . . . .	30
3.4 Fonctionnement et structure du système HCL . . . . .	34
3.5 Étude de la collaboration dans le système HCL . . . . .	37
3.6 Conclusion . . . . .	40
CHAPITRE 4 : MODÉLISATION . . . . .	41
4.1 Introduction . . . . .	41
4.2 Énoncé du problème . . . . .	41
4.3 Les ressources . . . . .	43
4.4 Notations . . . . .	43
4.4.1 La mutualisation . . . . .	44
4.4.2 Les plateformes . . . . .	46
4.4.3 Les offres de transport . . . . .	46
4.4.4 Les services . . . . .	47
4.4.5 La modélisation de la demande . . . . .	47
4.5 Modèle mathématique . . . . .	48
4.6 Conclusion . . . . .	54
CHAPITRE 5 : VALIDATION DU MODÈLE ET RÉSULTATS . . . . .	56
5.1 Introduction . . . . .	56
5.2 Expérimentation . . . . .	56
5.3 Résultats et analyses . . . . .	59
5.3.1 Les impacts de la variation des demandes . . . . .	60
5.3.2 Les impacts de la variation des services . . . . .	63
5.3.3 Études de la mutualisation et la multimodalité du réseau . . . . .	66
5.4 Conclusion . . . . .	72
CHAPITRE 6 : CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .	73
RÉFÉRENCES . . . . .	75

ANNEXES . . . . .	80
-------------------	----

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Les exigences de la logistique collaborative dans un réseau de la logistique urbaine hyperconnectée et mutualisée . . . . .	39
Tableau 5.1	Les différents cas étudiés en fonction des contraintes de partage ajoutées	57
Tableau 5.2	Les différents types de coalitions étudiées . . . . .	58
Tableau 5.3	Tableau récapitulatif des différentes instances des tests (réseaux et scénarios) . . . . .	59
Tableau 5.4	Les paramètres des instances . . . . .	60
Tableau 5.5	Temps d'exécution selon le nombre des clients pour S1 . . . . .	60
Tableau 5.6	Temps d'exécution total pour S2, S3 et S4 selon le nombre des clients	61
Tableau 5.7	Impact de la variation de la demande avec 70 services (S1) . . . . .	63
Tableau 5.8	Impact de la variation de la demande avec 80 services (S2) . . . . .	64
Tableau 5.9	Impact de la variation de la demande avec 90 services (S3) . . . . .	64
Tableau 5.10	Impact de la variation de la demande avec 100 services (S4) . . . . .	64
Tableau 5.11	Analyse de la structure de la flotte . . . . .	66
Tableau 5.12	Avantages et inconvénients du système proposé . . . . .	71

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Illustration du système de la Logistique Urbaine à deux-niveaux . . .	14
Figure 2.2	Modèle d'un $\pi$ -conteneur. Source: Ballot et al. (2014) . . . . .	20
Figure 2.3	Modèle de référence de "Open Logistics Interconnection" (OLI). Source: Montreuil et al. (2012) . . . . .	21
Figure 2.4	Modèle de route-rail $\pi$ -hub . Source: Montreuil et al. (2012) . . . . .	22
Figure 2.5	Résultats préliminaires de la simulation de réseau de distribution PI en France. Source: Montreuil et al. (2012) . . . . .	23
Figure 2.6	HCL: Le système de la logistique urbaine hyperconnectée . . . . .	25
Figure 3.1	Illustration d'un réseau HCL Crainic and Montreuil (2016) . . . . .	34
Figure 4.1	Illustration de l'itinéraire de la demande par rapport à la décision d'affectation . . . . .	48
Figure 5.1	Variation des coûts pour cas 0 . . . . .	61
Figure 5.2	Variation des coûts pour cas 1 . . . . .	62
Figure 5.3	Variation des coûts pour cas 2 . . . . .	62
Figure 5.4	Variation de CPU en fonction des différents scénarios de services . . .	65
Figure 5.5	Nombre de services effectués . . . . .	67
Figure 5.6	Kilométrage à plein et à vide par mode de transport . . . . .	68
Figure 5.7	Distribution des charges . . . . .	69
Figure A.1	Réseau N4: 4 satellites / 2 lignes de tram . . . . .	80
Figure B.1	Réseau N6: 6 satellites / 2 lignes de tram . . . . .	81
Figure C.1	Réseau N8-1: 8 satellites / 2 lignes de tram . . . . .	82
Figure D.1	Réseau N8-2: 8 satellites / 1 lignes de tram . . . . .	83

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BtoB	Business-to-Business
BtoC	Business-to-Consumer
CDU	Centre de Distribution Urbain
CL	City Logistics
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone
CPU	Computer Processing Unit
FTL	Full Truckload motor carrier
GES	Gaz à Effet de Serre
HCL	Hyperconnected City Logistics
IP	Internet Physique
IT	Information Technology
ITS	Intelligent Transportation System
LMDC	Last Mile Delivery Companies
LTL	Less than Truckload motor carriers
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économique
PI / $\pi$	Physical Internet
PIB	Produit Intérieur Brut
RAM	Random Access Memory
STI	Système de Transport Intelligent
VRP	Vehicle Routing Problem

**LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A	RÉSEAU N4: 4 SATELLITES / 2 LIGNES DE TRAM . . . . .	80
ANNEXE B	RÉSEAU N6: 6 SATELLITES / 2 LIGNES DE TRAM . . . . .	81
ANNEXE C	RÉSEAU N8-1: 8 SATELLITES / 2 LIGNES DE TRAM . . . . .	82
ANNEXE D	RÉSEAU N8-2: 8 SATELLITES / 1 LIGNES DE TRAM . . . . .	83



## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Le transport de marchandises, à l'intérieur et à l'extérieur des villes, est l'un des principaux moteurs des activités économiques et du développement des nations. Il constitue également un facteur important pour la plupart des activités économiques et sociales au sein de la vie urbaine [OCDE, 2003]. En effet, le transport de marchandises en ville constitue de 15% à 20% de l'ensemble des déplacements en véhicule. Cette complexité est amplifiée par l'augmentation de la population et de l'urbanisation [OCDE, 2003]. Selon les [nations unies, 2014], 54% de la population mondiale vivait dans des zones urbaines en 2014 et on s'attend à une augmentation de 66% d'ici à 2050 et 85% d'ici à 2100. Cela cause une augmentation des demandes et de la complexité des réseaux de distribution, puisque la plupart des activités nécessitent un déplacement de personnes ou de biens. De plus, ces dernières années, le nombre de véhicules en circulation a connu une forte hausse suite à l'étalement urbain et à l'augmentation de la population citadine. Ainsi, le secteur de transport est devenu une source de différentes sortes de nuisances telles que: les bruits sonores, la congestion, les émissions de particules polluantes et de CO<sub>2</sub> et la dégradation de la qualité de vie des citoyens en général. Afin de remédier à ces problèmes, de nouveaux paradigmes sont apparus, on s'intéresse spécifiquement à la logistique urbaine "*City Logistics (CL)*" et l'Internet Physique "*Physical Internet (PI)*".

L'objectif principal de la logistique urbaine est de réduire l'impact négatif des mouvements des véhicules de fret sur les conditions de vie urbaine, surtout, en termes de congestion, de mobilité et d'impacts sur l'environnement, sans pénaliser les différentes activités sociales et économiques et la conception d'un système de transport efficace et durable [Taniguchi, 2014]. Plus précisément, elle vise à réduire, à réglementer et à contrôler la présence des véhicules de transport de marchandises dans les aires urbaines, à améliorer l'efficacité des mouvements de marchandises et à réduire les impacts environnementaux surtout en minimisant la circulation à vide des véhicules de fret dans les routes urbaines [Benjelloun et Crainic, 2008] ; [Dablanc, 2007].

L'Internet Physique (PI), est un nouveau concept pour le transport de fret et de la logistique qui vise à améliorer l'efficacité économique, environnementale et sociale et la durabilité dont les objets physiques sont déplacés, entreposés, réalisés, fournis et utilisés partout dans le monde ([Montreuil, 2011] ; [Montreuil *et al.*, 2013]). En utilisant les mêmes concepts de l'Internet digital et de la même façon que les paquets de données transitent dans les réseaux de l'Internet digital, l'idée de PI consiste à router les marchandises encap-

sulées dans des conteneurs modulaires à travers un réseau global, interconnecté et ouvert [Montreuil, 2009] ; [Sarraj *et al.*, 2012]. [Montreuil *et al.*, 2012] ont défini l'Internet physique en tant qu'un système logistique ouvert, global et multimodal fondé sur l'interconnectivité universelle physique, numérique, opérationnelle, commerciale et juridique grâce à des encapsulations, des protocoles et des interfaces standards. L'interconnectivité à plusieurs niveaux mène à une nouvelle ère de la logistique, des chaînes d'approvisionnement et de transport hyperconnectés. Le concept de PI prend de l'ampleur dans la recherche et les applications récentes qui ont déjà prouvé des gains potentiels importants dans les transports interurbains de marchandises, les chaînes d'approvisionnement et la logistique [Ballot *et al.*, 2014] ; [Sarraj *et al.*, 2014].

Plusieurs concepts comme la coopération, la consolidation, la façon de la réalisation et de la mise en œuvre des activités du transport et du stockage de marchandise sont des concepts clés à la fois pour la logistique urbaine et pour l'Internet physique. Les deux systèmes de transport sont complémentaires, puisque la logistique urbaine fournit les segments finaux de la logistique interconnectée et les réseaux de transport de l'Internet physique. L'application des concepts innovateurs de l'Internet physique à l'environnement urbain a donné naissance à un nouveau paradigme "les systèmes de la Logistique Urbaine Hyperconnectée", "*Hyperconnected City Logistics*" (HCL). Ainsi, le système HCL fait partie d'un système logistique global basé sur l'interconnexion des réseaux logistiques par un ensemble standardisé de protocoles de collaboration, de conteneurs modulaires et d'interfaces intelligentes pour une efficacité et une durabilité accrues. Récemment, [Crainic et Montreuil, 2016] ont exploré les liens et les synergies nécessaires entre ces systèmes avancés du transport de fret et de la logistique. Cependant, au meilleur de notre connaissance, aucune planification, modélisation ou méthode d'optimisation n'ont été développées pour ce type de réseaux hyperconnectés. Notre objectif est de contribuer à combler ces lacunes en développant de modèles d'optimisation permettant de mettre en place une planification tactique de réseaux de la logistique urbaine hyperconnectée et mutualisée. En mettant l'accent sur l'importance de la collaboration dans l'Internet physique en général et dans le système HCL en particulier, on considère une association de transporteurs et de logisticiens mettant en commun leurs ressources et leurs capacités de transport dans un but d'optimiser les coûts économiques et l'impact écologique. Les différentes ressources des acteurs collaborateurs sont synchronisées, coordonnées par un gestionnaire représentant l'association.

L'objectif général de ce travail est de proposer une planification tactique liée à la conception et à la gestion du réseau de service hyperconnecté permettant d'affecter les différentes ressources, de déterminer les services de transport et d'assurer le partage des ressources et des coûts entre les acteurs collaborateurs. On présente, aussi, une formulation de programmation en

nombres entiers pour le problème tout en introduisant des contraintes liées aux concepts de la coopération, la gestion et le partage des ressources et des coûts. De plus, on évalue la façon dont un système de logistique urbaine hyperconnecté peut être rentable en introduisant le concept de la mutualisation entre plusieurs acteurs logistiques (transporteurs) avec le partage des ressources. On modélise, également, la gestion des ressources à savoir la taille des flottes de véhicules et la capacité des installations utilisées. En mettant l'accent sur l'importance de la multimodalité dans les réseaux hyperconnectés, on considère plusieurs modes de transport et on étudie leurs impacts sur le système proposé.

En plus de ce chapitre introductif, ce mémoire est constitué de cinq autres chapitres dont les objectifs sont définis ainsi:

- Le chapitre 2 permet de faire une mise en contexte et un état de la littérature sur les trois domaines principaux de cette thèse. On commencera par faire une revue de la littérature des systèmes de transport de marchandises en général. Ensuite, on présentera la logistique urbaine et on discutera des revues pertinentes. Après, on présentera une revue de la logistique collaborative et enfin on terminera l'état de l'art par la présentation du paradigme de l'Internet Physique.
- Dans le chapitre 3, on décrira avec détails les systèmes de la logistique urbaine hyperconnectée et ses principes fondamentaux. De plus, on proposera une étude des dimensions physique et opérationnelle nécessaires dans le contexte d'un réseau logistique hyperconnecté et mutualisé HCL.
- Le chapitre 4 sera consacré à la résolution du problème traité. On proposera des modèles décisionnels de planification tactique dans le contexte de la logistique urbaine hyperconnectée et mutualisée.
- Le chapitre 5 visera à prouver l'efficacité du modèle proposé. Il présentera une exposition des différentes catégories d'instances utilisées, une étude des scénarios proposés et enfin une analyse des résultats obtenus.
- On clôturera ce travail par différentes conclusions et perspectives de travaux futurs.

## CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE ET MISE EN CONTEXTE

### 2.1 Le transport de marchandises

Le transport est un domaine très important dans l'ensemble d'activités humaines. Il s'agit d'un domaine complexe, avec plusieurs joueurs et différents niveaux de décision de grands investissements qui soutiennent et rendent possibles la plupart des activités économiques, sociales et les échanges. Plus précisément, on s'intéresse au transport de marchandises qu'on considère comme l'une des activités les plus importantes, suite à son influence croissante sur tous les secteurs économiques dans le monde [Bektaş *et al.*, 2017].

Le transport de marchandises est, également, un élément-clé de la chaîne d'approvisionnement. [Crainic et Semet, 2005] ont défini le système de transport de marchandises comme étant un système qui permet l'acheminement de biens entre les lieux de production et de consommation. Il permet d'assurer le mouvement efficace et la disponibilité des matières premières et des produits finis en temps opportun [Crainic *et al.*, 2004].

Les secteurs de la logistique et des transports jouent, également, un rôle essentiel dans les économies modernes, en représentant les possibilités d'amélioration de la compétitivité des pays et en imposant d'importants défis sociaux et environnementaux. En 2015, les coûts de logistique et de transport ont représenté respectivement 7,85% et 9-10% des PIB des États-Unis et de l'Union européenne. La même année, ces industries ont contribué pour 5,5% aux émissions mondiales de GES. Ces résultats découlent des nouvelles tendances du marché et de l'émergence des exigences (par exemple, urbanisation, commerce électronique, etc.) et des systèmes logistiques et de transport de nature « complexe » (par exemple, plusieurs acteurs ayant différents objectifs, incertitudes, etc.). De plus, avec la mondialisation et le changement d'habitudes de consommation, le monde a connu une grande augmentation de production et de demande, ce qui a conduit à multiplier les solutions et les services de transport. Cette situation a engendré la saturation des infrastructures, la multiplication exponentielle des flux de cheminement de marchandises et par conséquent, la hausse des coûts de transport. Finalement, à part les enjeux économiques, c'est important de penser aux conséquences des pratiques logistiques actuelles, sur l'environnement et le développement social et culturel. Ces multiples enjeux engendrent une mise en cause des pratiques et du développement de systèmes de transport actuels. Par conséquent, le transport de marchandises doit s'adapter à l'évolution rapide des conditions et des tendances politiques, sociales et économiques.

### 2.1.1 Les niveaux de planification

Les systèmes de transport de marchandises sont des systèmes complexes qui impliquent une grande quantité de ressources humaines et matérielles et qui présentent des relations complexes entre les différentes décisions et politiques de gestion affectant leurs différentes composantes. Selon [Crainic, T.G. et Laporte, G., 1997], les différents systèmes de transport de marchandises nécessitent trois niveaux de planification du transport de marchandises :

- **Le niveau stratégique** : c'est la planification stratégique au niveau de l'entreprise qui implique généralement le plus haut niveau de gestion et qui nécessite d'importants investissements à long terme. Les principales décisions à ce niveau portent sur les infrastructures à mettre en place pour assurer le flux des produits, selon diverses combinaisons de modes, afin de réduire les coûts de transport [Crainic *et al.*, 2006]. On peut citer plusieurs types de problèmes au niveau stratégique tels que: la localisation de terminaux (plateforme multimodale, plateforme de crossdocking, etc.), l'équipement des plateformes, la construction de lignes (routes, chemin de fer) supplémentaires et même la destruction de certaines infrastructures;
- **Le niveau tactique** : il s'agit de la politique à moyen terme. La planification tactique s'étend sur une période de quelques mois à une semaine. À ce niveau, on considère la gestion de la flotte de véhicules de différents modes pour assurer le transport des produits des origines aux destinations. Ce niveau consiste à déterminer des mouvements de transport, dans le temps, entre origines et terminaux, inter-terminaux et entre terminaux et destinations. La planification tactique produit un plan de transport qui garantit la qualité de service requise pour les clients et l'utilisation efficace des ressources. Ainsi, les décisions prises au niveau tactique concernent principalement : la sélection des services à offrir, leur fréquence (ou horaire), la distribution du transport des demandes sur ces services et les politiques au niveau des terminaux (consolidation);
- **Le niveau opérationnel** : cette planification concerne la gestion à court terme. Ce niveau est associé aux opérations et ces problèmes sont fortement influencés par le temps. Les décisions opérationnelles sont considérées pour assurer le fonctionnement de la chaîne logistique. Ce niveau implique des décisions concernant l'ordonnancement de la production, l'affectation des produits aux chaînes et/ou aux véhicules et la gestion (contrôle) dynamique des ressources. On peut citer différents problèmes opérationnels tels que : les problèmes de transport de fret maritime par conteneurs, les problèmes de tournées de véhicules, etc.

### 2.1.2 Les différents enjeux du transport de marchandises

La logistique et les systèmes de transport sont affectés, généralement, par trois types d'inefficiences [Montreuil *et al.*, 2012] :

- **Enjeux économiques** : à l'échelle mondiale, les coûts de la logistique et du transport de marchandises augmentent de plus en plus;
- **Enjeux environnementaux** : les impacts négatifs de transport de marchandises sur l'environnement (émissions de  $CO_2$ , consommation énergétique, bruit, etc.) augmentent de plus en plus malgré que les nations et les gouvernements visent à améliorer la durabilité de l'environnement et consacrent d'importants budgets pour sa protection et à réduire le taux d'émission des polluants atmosphériques.

Selon les statistiques d'"Environnement Canada", entre 1990 et 2014, les émissions des gaz à effet de serre provenant du secteur des transports ont augmenté de 32%. Pendant la même période, les émissions provenant du transport de marchandises ont enregistré une hausse de 86%. Les émissions des camions pour le transport de marchandises augmentant de 132% et celles des autres modes de transport de marchandises augmentant de 2% ;

- **Enjeux sociaux** : le transport de marchandises engendre aussi des nuisances au niveau social telles que : la dégradation de niveau de vie et de la sécurité routière, le manque d'accessibilité rapide, fiable et abordable et de mobilité de marchandises, etc. Par ailleurs, trop souvent les conditions de travail au domaine de transport de marchandises manquent de la stabilité, de la certitude et de la sécurité.

L'insoutenabilité et l'inefficacité des systèmes de transport traditionnels, ont incité les chercheurs et les praticiens à s'engager dans des études et des travaux visant à réduire les différents types d'impacts négatifs. Par conséquent, ces dernières années, plusieurs visions sont apparues, parmi les plus efficaces on s'intéresse particulièrement à trois cadres théoriques innovants : La logistique collaborative, la Logistique Urbaine "*City Logistics (CL)*" et l'Internet Physique "*Physical Internet (PI)*".

## 2.2 La logistique collaborative

### 2.2.1 Définition de la logistique collaborative

Les modèles de la logistique collaborative sont apparus au cours des années 80 comme un nouveau champ d'application de la gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM) qui

englobe la planification et la gestion de toutes activités d’approvisionnement et de gestion logistique. En outre, elle inclut la coordination et la collaboration avec les différents acteurs de la chaîne, qui peuvent être des fournisseurs, des intermédiaires, des fournisseurs de services tiers et des clients [Rusich, 2017].

Dans ce contexte, apparaît le concept de la logistique collaborative. En effet, les entreprises et les sociétés décident de collaborer lorsqu’elles s’attendent à maximiser des gains qui ne peuvent être générés qu’à travers des relations d’échange, de collaboration et de partenariat, mais, jamais individuellement [Dyer et Singh, 1998]. Par ailleurs, [Audy *et al.*, 2012], ont conclu que la logistique collaborative se produit lorsque deux ou plusieurs unités commerciales autonomes et auto-intéressées forment une coalition et échangent/partagent des ressources (y compris l’information) dans le but de prendre des décisions et d’entreprendre des activités génératrices d’avantages qu’elles ne peuvent générer (ou seulement partiellement). Ces besoins et ces objectifs ont fait apparaître plusieurs définitions de la logistique collaborative. Selon [CSMP, 2013], c’est le travail en commun et la communication entre des personnes et des systèmes (y compris les partenaires commerciaux, les fournisseurs et les clients) afin d’atteindre un objectif commercial commun.

### 2.2.2 Les types de logistique collaborative

En analysant l’état de l’art de la logistique collaborative, on remarque que les modèles de la collaboration logistique ont évolué au fil du temps afin de répondre aux besoins des parties prenantes en logistique et en transport. Historiquement, les premiers modèles qui ont émergé sont des modèles monodimensionnels. La plupart du temps, ce type de collaboration se produit entre des acteurs opérant dans différentes couches d’un même réseau de la chaîne d’approvisionnement. Cependant, ces dernières années, la pression croissante sur les systèmes de logistique et de transport a amené les acteurs de la logistique à développer des stratégies de collaboration bidimensionnelle visant à renforcer la flexibilité et l’efficacité des chaînes d’approvisionnement. Récemment, l’émergence de nouveaux paradigmes logistiques, comme l’Internet physique et la logistique urbaine, nécessite l’apparition de modèles de collaboration innovateurs. Ces systèmes sont caractérisés par une application simultanée et interactive des stratégies monodimensionnelles et bidimensionnelles. Les quatre types de la logistique collaborative présentés dans la littérature scientifique sont :

1. **La collaboration verticale** : cette collaboration se produit lorsque des différentes organisations telles que les fournisseurs, les fabricants, les fournisseurs de services et les détaillants partagent leurs responsabilités, leurs ressources et leurs informations sur le rendement afin de mieux servir des clients finaux relativement similaires [Xu, 2013];

2. **La collaboration horizontale** : cette collaboration se produit entre un groupe des parties prenantes des différentes chaînes d’approvisionnement agissant aux mêmes niveaux et ayant des besoins analogues [Gonzalez-Feliu *et al.*, 2013];
3. **La collaboration diagonale** : la collaboration diagonale vise à accroître la flexibilité en combinant et en partageant les capacités à la fois verticalement et horizontalement [Okdinawati *et al.*, 2015];
4. **La collaboration interconnectée** : ce type de collaboration vise à réduire les impacts sociaux, économiques et environnementaux des systèmes logistiques actuels en combinant simultanément différents types de collaborations logistiques, plus simples, à différents niveaux et dans différents modes, créant ainsi des réseaux logistiques interconnectés [Rusich, 2017].

Dans notre travail, on s’intéresse à la collaboration interconnectée proposée par [Rusich, 2017]. Ce type de collaboration répond aux exigences d’un système logistique hyperconnecté basé sur : la mutualisation, la collaboration et l’hyperconnexion des réseaux logistiques. Cette notion de collaboration est principalement basée sur la notion de partage.

### 2.2.3 La notion du partage

[Gonzalez-Feliu et Salanova, 2012], ont étudié la notion de partage dans la logistique. En général, les principales ressources partagées sont : l’information, l’infrastructure, les outils de gestion / planification, les véhicules et les ressources humaines. Les auteurs ont défini trois approches de partage au niveau du transport et de la logistique :

- **Le partage non-collaboratif** : les ressources partagées sont gérées par leurs utilisateurs. Dans ce cas, il n’y a pas de collaboration entre les utilisateurs;
- **Le partage collaboratif avec une prise de décision hiérarchique** : les ressources partagées sont généralement gérées par leurs utilisateurs, mais les principaux processus de décision sont collaboratifs et hiérarchisés;
- **Le partage collaboratif avec une prise de décision non hiérarchique** : les ressources partagées sont généralement gérées par leurs utilisateurs qui vont contribuer dans les différents processus de décision.

Dans le partage non-collaboratif et le partage collaboratif avec une prise de décision hiérarchique, les décisions sont prises par un seul décideur. Par contre, dans le partage collaboratif



avec une prise de décision non hiérarchique, ces décisions sont prises par les membres d'un groupe de collaboration formé par des acteurs liés par un contrat de partenariat ou par d'autres types d'accords. Lorsque deux ou plusieurs acteurs décident de collaborer dans une approche de partage, on peut les appeler des partenaires. Le partage peut être formalisé par des accords écrits sous forme de contrats formels entre les différents collaborateurs ou partenaires ou sous forme d'accords non formels [Lambert *et al.*, 1996].

Dans le cadre de notre travail, on étudie un système mutualisé dans lequel les acteurs collaborateurs sont des transporteurs qui forment une coalition et qui partagent leurs ressources. Cependant, la gestion d'organisation et des ressources est assurée par une entité gérante. Dans ce cas, le partage collaboratif peut être défini comme une utilisation collaborative des ressources logistiques matérielles et immatérielles, tout en assurant une bonne gestion des actions afin de garantir un meilleur déroulement et une continuité de la collaboration.

#### **2.2.4 La mutualisation logistique**

Dans la littérature, la mutualisation a été présentée comme une manière d'organiser et d'optimiser les plans logistiques de différents acteurs (transporteurs, fabricants, détaillants, etc.) par un partage entier ou d'une partie des ressources physiques (camions, dépôts, etc.), ressources humaines (chauffeurs, chargeurs, etc.) et des flux d'informations. [Agrion, 2009], a défini la mutualisation comme une consolidation des flux de transport dans le but de concentrer la marchandise dans un même entrepôt et par la suite les expédier, à des clients différents, dans des véhicules communs. L'auteur a affirmé que cette forme de mutualisation vise à avoir « des livraisons plus fréquentes, un taux de service accru, des produits de meilleure qualité et des camions mieux remplis avec des coûts logistiques réduits » [Agrion, 2009].

Concernant le contexte de notre problème, on s'intéresse à la mutualisation des ressources logistiques de différents transporteurs collaborateurs qui ont formé une coalition. Les transporteurs collaborateurs sont généralement dans une même zone géographique et ont des activités communes en matière du type de marchandises transportées. Ces transporteurs s'associent pour transporter la marchandise à leurs clients finaux en utilisant des ressources et des infrastructures partagées. En pratique, la marchandise destinée à une même zone géographique est centralisée dans un centre de distribution (privé ou commun), puis livrée par un camion à charge complète. Plusieurs types de gains peuvent être considérés dans l'approche de la mutualisation des services logistiques comme : le gain en termes de ressources logistiques, l'augmentation des taux de remplissage des véhicules, la diminution des coûts de transport et d'entreposage et la diminution du nombre de véhicules nécessaires à la distribution afin de réduire le trafic et l'impact sur l'environnement.

## 2.3 Le transport de marchandises en ville / La logistique urbaine

Le transport de marchandises dans les zones urbaines est une activité complexe et essentielle à la vie économique et sociale de toute ville. Cependant, il contribue à des nuisances importantes, par exemple, la congestion, les émissions, le bruit et la consommation excessive de combustibles fossiles. La complexité et l'impact du transport de marchandises dans les villes sont encore amplifiés par deux tendances marquantes observées à l'échelle mondiale: l'urbanisation croissante et le commerce électronique [Fontaine *et al.*, 2017]. Afin de résoudre ces problèmes, de nouveaux modèles organisationnels et paradigmes sont proposés dans la littérature scientifique sous le nom de "la logistique urbaine", "*City Logistics* (CL)". ([Taniguchi *et al.*, 2001b] ; [Taniguchi et Thompson, 2002]) ont défini la logistique urbaine comme étant : « *The process of totally optimising the logistics and transport activities by private companies in urban areas while considering the traffic environment, traffic congestion and energy consumption within the framework of a market economy* ».

C'est à partir de ces définitions que vient le terme « logistique urbaine ». Cette initiative vise à étudier les différents enjeux liés aux mouvements de marchandises, dans les zones urbaines, essentiels pour la plupart des activités économiques et sociales de la ville [Muñuzuri *et al.*, 2005]. Selon [Crainic, 2008], ce système est principalement, caractérisé par la consolidation des charges des multiples transporteurs avec un seul véhicule de livraison et la coordination des différentes activités, opérations et acteurs de transport de marchandises dans la ville.

Plusieurs travaux ont présenté les objectifs principaux de ce paradigme afin de résoudre les nuisances liées à la distribution de fret dans les aires urbaines ([Taniguchi *et al.*, 2001b] ; [Taniguchi et Thompson, 2002] ; [Crainic *et al.*, 2011] ; [Crainic et Sgalambro, 2009]). On peut citer :

- La réduction de la congestion et l'amélioration de trafic dans la ville, lié au mouvement de véhicules de transport de marchandises dans la ville;
- La réduction de la circulation-à-vide des véhicules de transport de marchandises dans les aires urbaines;
- L'optimisation de l'utilisation et la maximisation du taux de remplissage des véhicules de fret;
- La réduction des émissions, de pollution et du bruit;

- La prise en considération de tous ces objectifs, mais sans pénaliser et affecter les activités économiques et sociales des villes ([Crainic *et al.*, 2011] ; [Crainic et Sgalambro, 2009]).

La vision du CL concerne la planification et le déploiement d'un système logistique intégré, dans lequel toutes les parties prenantes participantes pourraient s'engager dans la planification et l'exploitation d'un réseau de transport de marchandises urbain plus durable (structure n-tiers). Un bref résumé, des acteurs potentiels du CL, est rapporté dans le travail de [Benjelloun et Crainic, 2008] :

- Gouvernements : internationaux (par exemple, Commission européenne), les décideurs nationaux et régionaux encouragent l'élaboration des systèmes innovateurs et favorisent le développement technologique au domaine du transport de marchandises (par exemple, la communication cellulaire dans les STI);
- Municipalités : partenaires neutres actifs (régulateurs, initiateurs, etc.) dans les implémentations existantes;
- Expéditeurs : toujours impliqués dans les initiatives de CL au niveau de la planification;
- Transporteurs : les transporteurs et les opérateurs d'entrepôts font toujours partie du processus de gestion des opérations;
- Clients finaux : les citoyens appartiennent aux chaînes d'approvisionnement B2C "*Business to Consumer*". Les magasins, les hôpitaux, etc., appartiennent aux chaînes d'approvisionnement B2B "*Business to Business*". Les clients sont, généralement, impliqués dans l'évaluation des performances des projets CL et dans la validation des modèles commerciaux.

En analysant la littérature, on remarque que traditionnellement, les initiatives CL ont été lancées par les pouvoirs publics. Cependant, récemment, les variations de la demande des clients, l'augmentation des coûts liés à la logistique et au transport et les nouveaux défis des villes ont amené des groupes d'entreprises privées à s'impliquer dans le marché du CL. Par conséquent, les publications scientifiques les plus récentes portent sur la logistique urbaine d'un point de vue privé (par exemple, les courriers express, les fournisseurs de services, les propriétaires de magasins, etc.).

### 2.3.1 Les installations

Les installations sont des emplacements intermédiaires pour les flux de marchandise provenant des expéditeurs vers les destinataires. Ils jouent un rôle important dans la logistique urbaine en tant que centres de consolidation des flux, de coordination des activités de transport, de transbordement et de stockage, ainsi que de la synchronisation des mouvements des véhicules. En effet, selon [Bektas *et al.*, 2015], la rationalisation des activités de transport permet d'obtenir des gains significatifs en réduisant le nombre de véhicules de transport de marchandises circulant dans la ville. La consolidation de charges de différents transporteurs dans les mêmes véhicules, associée à une certaine forme de coordination des opérations dans la ville, est l'un des moyens les plus importants pour parvenir à cette rationalisation.

Deux principaux types d'installations sont généralement considérés dans les réseaux logistiques urbains, "les centres de distribution urbains (CDU)" et "les satellites".

Les centres de distribution urbaine comprennent toutes les initiatives qui utilisent une installation, dans laquelle les flux qui viennent de l'extérieur de la ville sont consolidés afin de regrouper les activités de transport du centre-ville ([Van Rooijen et Quak, 2010] ; [Bektas *et al.*, 2015]). Les CDU ne sont pas nouveaux puisqu'ils ont été déjà examinés dans les années soixante-dix. On peut citer l'exemple de [McDERMOTT, 1975] qui a étudié les avantages et les inconvénients de l'utilisation de CDU pour les transporteurs, les expéditeurs, les consommateurs, la société et les autorités. La majeure partie de la littérature sur les CDU s'est concentrée sur la forme traditionnelle de transbordement mis en œuvre au niveau urbain et qui prend en compte la coordination entre les utilisateurs, tout en consacrant beaucoup d'attention à l'utilisation de petits véhicules pour la distribution urbaine [McKinnon, 1998]. L'idée de l'initiative de centres de consolidation est de séparer les activités de distribution en activités à l'intérieur de la ville et activités à l'extérieur de la ville. Le transbordement à l'extérieur de la ville permet de bénéficier des avantages de gros véhicules pour le transport long distance en dehors des zones urbaines denses. Après le déchargement dans un centre de consolidation, les véhicules à faible capacité transportent des marchandises à d'autres installations dans la ville ou aux clients finaux. Le fait que ces véhicules puissent être pleinement chargés est un avantage supplémentaire qui permet de diminuer le nombre de véhicules entrant dans la ville. Il faut aussi tenir compte que les livraisons fréquentes, à faible volume et avec des produits simples sont plus intéressantes pour les centres de consolidation ([Van Rooijen et Quak, 2010]. [Browne *et al.*, 2005] soulignent que les principaux bénéficiaires des CDU sont les détaillants indépendants et les petites entreprises ainsi que les transporteurs faisant des petites livraisons surtout dans les zones où il existe des contraintes et des limitations sur les conditions de livraison.

Les satellites sont similaires aux CDU mais ils sont différents en termes de localisation et de fonctionnalités ([Bektas *et al.*, 2015] ; [Benjelloun, A. *et al.*, 2008] ; [Crainic, 2008] ; [Crainic *et al.*, 2009]). Les satellites peuvent être situés dans la zone urbaine, même dans les zones denses. Les installations existantes, telles que les parkings, les centraux d'autobus ou les gares peuvent être utilisés comme satellites. Ces plateformes sont généralement conçues comme des points de rendez-vous ou de "*cross-docking*", où la marchandise est transférée d'un véhicule à un autre, idéalement d'une manière synchronisée.

Récemment, les satellites avec des installations d'entreposage commencent à être étudiés et mis en œuvre. Ces installations se retrouvent, surtout, dans les initiatives privées (par exemple, [Huart, 2011]).

### 2.3.2 Les niveaux dans la logistique urbaine

Le terme "niveau" ou "échelon" est souvent utilisé dans le contexte de la logistique urbaine pour décrire un ensemble d'entités qui ont des fonctions similaires. Jusqu'à présent, deux configurations majeures ont été proposées :

- D'abord, on a **les réseaux CL à un seul niveau** : les systèmes de logistique urbaine à un seul niveau exploitent un seul niveau d'activités de consolidation-distribution, avec des itinéraires de distribution commençant à un centre de distribution urbain (CDU) ("*City Distribution Center*") et livrant les charges directement aux citoyens. Ils sont, généralement, développés dans les petites et moyennes villes : le fret atteint la zone urbaine dans les véhicules à pleine charge qui le livrent vers un centre de distribution urbain. Les CDU sont les installations dans lesquelles la consolidation des charges se déroule et les activités de distribution sont coordonnées. Les véhicules urbains ("*urban vehicles*") sont utilisés pour livrer le fret directement du CDU aux clients finaux. Les projets de la logistique urbaine à un seul niveau, étaient, initialement, entrepris en Europe et au Japon impliquant principalement un CDU unique et un nombre limité d'expéditeurs et de transporteurs. Différents modèles et stratégies ont été testés [Taniguchi *et al.*, 2001a] ; [Visser *et al.*, 1999];
- Ensuite, on a **les réseaux de CL multi-niveaux** : ces systèmes ont été introduits pour mieux répondre aux besoins de transport de marchandises de grandes villes. La majorité de ces systèmes ont une structure à deux niveaux, impliquant plusieurs types d'installations, de modes de transport et de flottes. Généralement, dans un tel système, les charges sont regroupées au sein d'un CDU dans de grands véhicules et transportées vers un satellite

« proche » du centre-ville. Au premier niveau, la marchandise de différents expéditeurs est consolidée dans des véhicules urbains (communs) adaptés pour circuler dans les zones urbaines denses, tout en utilisant la totalité de leur capacité. Les camions urbains utilisent des routes sélectionnées pour faciliter leur circulation et réduire leurs impacts sur le trafic et l'environnement tout en optimisant leurs tournées.

Le deuxième volet de système consiste dans les plateformes satellitaires: la marchandise en provenance des CDU est transportée dans les camions urbains qui peuvent visiter plusieurs satellites durant la même tournée. Dans les systèmes avancés, les satellites n'exercent aucune activité de stationnement ou d'entreposage intermédiaire. En passant par les satellites, les charges seront déplacées directement dans des « city-freighters » qui sont des véhicules standardisés, économes et ayant des capacités relativement faibles. Ils assurent la distribution de la marchandise en départ des satellites vers les points de livraisons finaux ([Crainic *et al.*, 2009] ; [Bektas *et al.*, 2015]). La figure 2.1 présente une illustration d'un système logistique urbaine à deux-niveaux selon [Crainic et Sgalambro, 2013].

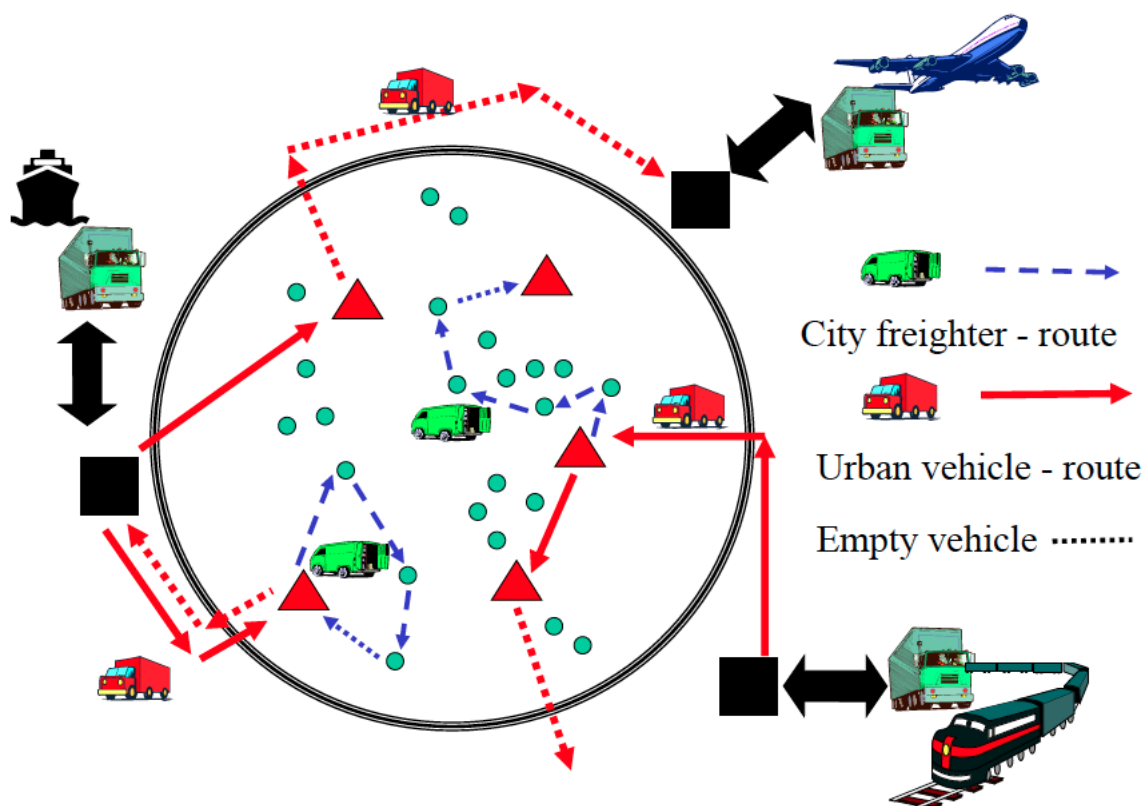


Figure 2.1 Illustration du système de la Logistique Urbaine à deux-niveaux

Dans la pratique, les types d'installations et les modes de transport utilisés augmentent, ce qui conduit à de véritables systèmes à plusieurs niveaux qui adaptent les opérations et les ressources à chaque zone urbaine distincte [Bektaş *et al.*, 2017]. Le concept de la logistique urbaine interconnectée proposé par [Crainic et Montreuil, 2016], illustre ces développements. Le cadre de notre travail fait référence à ce concept innovateur. On s'intéresse spécifiquement, au système de la logistique urbaine hyperconnectée, qui construit et développe l'idée de l'interconnexion, de la consolidation et de la coordination des mouvements de transport de marchandises et des acteurs dans les aires urbaines. On étudie ce système avec précision dans le chapitre 3.

### 2.3.3 Les problèmes de planification dans la logistique urbaine

La logistique urbaine se traduit par des systèmes complexes, de transport et de logistique, basés sur la consolidation, caractérisés par des parties prenantes multiples et diverses, des couches d'installations, des modes de transport et des flottes, etc. Comme tout système de transport complexe, les systèmes de transport de la logistique urbaine nécessitent une planification aux niveaux stratégique, tactique et opérationnel de la prise de décision.

D'abord, on a le niveau stratégique qui concerne la conception du système logistique, l'évaluation des performances du système de transport de marchandises proposé et la politique d'action envers différents scénarios possibles. Il aborde également, l'analyse continue de la performance, l'évolution, l'adaptation du système de transport de fret déployé aux différents besoins et son comportement par rapport au système de l'environnement général qui l'englobe. Ces différents principes doivent être étudiés pour assurer la continuité de cette planification dans le temps. Il est donc important d'examiner les différents besoins et motivations qui vont définir les politiques principales du système logistique.

Selon [Benjelloun et Crainic, 2008], les principales composantes de **la planification stratégique** des systèmes de transport sont :

1. **La modélisation de l'offre** : afin de représenter l'infrastructure, la répartition géographique de la région, les différents modes, les services de transport et leurs opérations caractéristiques et économiques. Cette étape nécessite également des décisions sur le nombre, les caractéristiques et la disposition des installations intermodales, les CDU, les plateformes satellitaires, etc;
2. **La modélisation de la demande** : définir les produits et identifier les producteurs,

les transporteurs, les intermédiaires, la production totale, le volume de distribution ainsi que les choix de mode de transport;

3. **L'affectation des flots multicommodité au réseau multimodale** : cette étape nécessite la simulation du comportement du système de transport dans divers scénarios possibles, ses résultats forment la base des activités de planification [Crainic *et al.*, 2009].

Deuxièmement, on a la **planification tactique** qui se concentre sur la conception du réseau de service ("*service network design*"). Les réseaux CL sont conçus comme des systèmes de transport basés sur la consolidation dans lesquels on a : les heures de départ, les itinéraires, les charges de véhicules, la demande de routage, l'utilisation des installations de consolidation de second niveau et le réseau de distribution [Crainic *et al.*, 2009]. De cette façon, on peut obtenir un meilleur taux d'utilisation des ressources et une gestion des opérations efficace. La planification tactique dans la CL a un court horizon de planification en raison de la visibilité quotidienne de la demande.

Enfin, on a le **niveau opérationnel** qui concerne le contrôle de gestion du système de transport. Dans cette étape, il faut ajuster les plans d'action et gérer les différentes activités du personnel des terminaux, des conducteurs et des transporteurs ainsi que l'utilisation des véhicules et des terminaux. En outre, le contrôle en temps réel du système pourrait impliquer des adaptations dynamiques des véhicules et des horaires terminaux.

## La planification tactique

Notre projet consiste à faire une planification d'un système de la logistique urbaine hyper-connectée (HCL). Pour cela, dans cette section on présentera la planification tactique avec plus de détails.

La planification tactique des systèmes de transport de la logistique urbaine, qui se basent généralement sur la consolidation, vise à établir une stratégie qui permet d'assurer l'efficacité des différentes opérations de transport et d'utilisation des ressources, tout en tenant compte des critères de qualité (par exemple, les délais de livraison). Au niveau tactique, on s'intéresse au problème de conception de réseau de service.

La planification tactique des systèmes de la logistique urbaine, vise à établir un plan de transport (ou de chargement) pour assurer l'efficacité des opérations et de l'utilisation des ressources, tout en satisfaisant la demande de transport selon les critères de qualité (par exemple, délai de livraison) [Crainic *et al.*, 2006]. Le processus consiste à : sélectionner les services à exploiter (itinéraires, types de véhicules, vitesse, etc.) et leurs horaires ; déterminer



les politiques et les règles de la consolidation du fret et des véhicules dans les terminaux ; déterminer les itinéraires pour déplacer la marchandise ; déterminer des politiques de gestion des ressources [Fontaine *et al.*, 2017], etc.

Les modèles de planification tactique pour la logistique urbaine concernent généralement, les heures de départ, les itinéraires et les charges des véhicules, l'acheminement de la demande et l'utilisation des satellites. Ces modèles permettent le déploiement des ressources et la planification des opérations et des ressources humaines en temps réel du système. Ils sont également des composants importants des modèles et procédures d'évaluation des systèmes de la logistique urbaine.

([Crainic *et al.*, 2009] ; [Crainic *et al.*, 2015]) ont présenté une discussion approfondie concernant les enjeux et les défis de la planification tactique pour les opérations de la logistique urbaine. Les auteurs ont développé aussi, une description détaillée des problèmes d'organisation, d'exploitation et de planification du système de la logistique urbaine à deux niveaux. Ils introduisent, également, un cadre méthodologique générique complet pour la planification tactique des opérations en considérant plusieurs modes, types de véhicules et de produits en proposant des formulations mathématiques et algorithmiques. Leurs modèles se concentrent sur la veille (The-day-before) du problème de planification tactique, où un plan est élaboré chaque jour pour l'ensemble du système compte tenu de la demande particulière pour ce jour. Notre étude est basée sur le cadre proposé par [Crainic *et al.*, 2009].

Dans notre travail, on se concentre, spécifiquement, sur le problème de conception de réseau de service. Selon [Schrenk, 2010], un service est défini comme étant un trajet spécifique (d'un sommet de départ vers un sommet d'arrivée) à des horaires spécifiques (ou avec une certaine fréquence) avec une certaine qualité de service. Un état de l'art global de la conception de réseau de service pour le transport des marchandises est introduit par [Crainic, 2000] qui ont défini le problème de conception de réseau de service en tant que problème basique de planification tactique. Les formulations du problème de conception de réseau de services sont généralement, associées au moyen terme. Ce type de problème est souvent utilisé dans les problèmes de transport de marchandises avec consolidation. L'objectif du processus de planification consiste à déterminer le plan de transport, c'est-à-dire sélectionner les services qui seront offerts, leurs fréquences et les horaires. Dans l'élaboration du plan de planification, on vise la satisfaction des clients et l'utilisation efficiente/efficace des ressources, ce qui permet de minimiser les coûts totaux.

Le modèle de conception de réseau de service à deux niveaux proposé par [Crainic *et al.*, 2009] se base sur une formulation qui dépend du temps et basée sur les chemins. Les clients sont regroupés dans des zones clients avec des fenêtres, de temps de

service et des demandes spécifiques. Les emplacements physiques des installations de premier et de deuxième niveau (CDU et satellites), ainsi que les zones clients sont dupliquées pour chaque période de l'horizon de planification envisagé. Les services de premier et deuxième niveaux constituent les liens du réseau. Au premier niveau, on sélectionne les services des véhicules urbains, qui peuvent appartenir à divers modes de transport, identifiés par leur itinéraire d'un CDU à un certain nombre de satellites et retournant à une plateforme de premier niveau (pas nécessairement le même que celui de départ) ou à une sortie du système. Les véhicules sont caractérisés par leur heure de départ et d'arrivée et par l'heure de départ à partir de chaque satellite sur leur itinéraire. Les services de deuxième niveau correspondent à des affectations de travail des "*city-freighters*" qui sont définis comme des itinéraires multi-tours dépendant du temps. Chaque segment de travail commence à partir d'un dépôt initial et ensuite, visite une série de satellites pour le chargement de la marchandise, après, livre à un certain nombre de clients jusqu'à ce que la longueur de la route ou d'autres restrictions de temps forcent le travail à se terminer en retournant au dépôt initial.

La présence simultanée des véhicules urbains et des "*city-freighters*" aux satellites, doit être synchronisée. Le transbordement des charges, entre les deux types de véhicule, doit être effectué sans la possibilité de stockage intermédiaire et avec un temps d'attente très limité. Les itinéraires des clients sont définis comme étant des trajets à travers le réseau de services, constitués d'un service de premier niveau, d'un transbordement sur un satellite et d'un itinéraire "*city-freighters*". Ces itinéraires imposent ces exigences et assurent une livraison rapide de marchandises aux clients finaux.

Les services sur les deux niveaux sont représentés comme des chemins dans un réseau espace-temps. Les auteurs ont défini deux ensembles de variables de décision binaires, pour sélectionner les services dans chaque niveau. Après, ils introduisent un troisième ensemble de variables de décision binaires pour sélectionner les itinéraires des clients. La formulation de conception de réseau, basée sur les chemins, minimise une fonction de coût total généralisée incluant des coûts d'exploitation et de nuisance pour chaque type de véhicule reflétant l'impact des opérations sur la ville. Les contraintes imposent la livraison unique aux clients, les limites de capacité des véhicules, des satellites et la taille de la flotte.

## 2.4 L'Internet Physique (PI)

Dans cette section, on va présenter un système logistique et de transport innovant, l'Internet Physique (PI). Ce concept a été proposé en 2009 par "Benoit Montreuil" [Montreuil, 2009]. Depuis, le paradigme a continué à solliciter l'intérêt des gouvernements, des acteurs logistiques et des chercheurs qui se sont engagés afin de proposer une réorgani-

sation efficace des systèmes logistiques traditionnels.

### 2.4.1 Définition et objectifs de l'Internet Physique (PI)

L'Internet Physique (PI) est défini comme étant un système de logistique mondiale, ouvert et fondé sur l'interconnectivité physique et numérique par encapsulation, protocoles et interfaces [Montreuil, 2009].

En effet, « la mission de IP est d'améliorer l'efficacité économique, environnementale et sociétale et la durabilité de la façon dont les objets physiques sont déplacés, stockés, réalisés, fournis et utilisés partout dans le monde » ([Montreuil, 2011] ; [Montreuil *et al.*, 2013]).

L'objectif principal, de l'Internet Physique, est de mettre en œuvre un système logistique efficace, durable, adaptable et flexible [Montreuil, 2011].

Afin de réaliser ces objectifs, PI envisage la mise en place d'un « système logistique mondiale ouvert, exploitant les réseaux d'approvisionnement interconnectés en utilisant un ensemble standard de conteneurs modulaires, de protocoles de collaboration et d'interfaces pour accroître l'efficacité et la durabilité » [Ballot *et al.*, 2014].

L'idée générale de la PI était de s'inspirer du concept d'Internet numérique dans les télécommunications (logique, protocoles, etc.) et de l'adapter aux réseaux de logistique et de transport. Cela était proposé en tenant compte des différences entre les systèmes numériques et physiques, puisque les paquets de données et les objets physiques (marchandises) ne peuvent pas être transportés et traités de la même façon (le fret ne peut pas se déplacer seul).

Cependant, il existe des points en commun entre les deux concepts : dans l'Internet digital, le paquet TCP/IP encapsule les données et se met directement sur le réseau et les fournisseurs d'accès vont, seulement, les manipuler. De même, dans l'Internet Physique, la marchandise est conteneurisée dans des boîtes intelligentes standardisées qui seront transportées dans un réseau ouvert et interconnecté. L'expéditeur n'intervient pas dans les opérations réelles du transport, la gestion des terminaux, les infrastructures de stockage, etc. Dans un tel système, le transport de marchandises se déroule de manière ouverte et consolidée à l'aide d'une série de services de transporteurs et d'infrastructures. L'Internet Physique, propose d'interconnecter les différentes prestations logistiques pour en faire un réseau ouvert, dans lequel, il y a une consolidation de l'ensemble des ressources de la chaîne logistique. Donc, l'idée est d'imaginer une interconnexion globale et universelle des réseaux et des prestations de services logistiques.

Ceci pourrait générer des gains significatifs en termes, financier et environnemental, vis-à-vis du niveau de consolidation qu'il prétend atteindre. Cette notion d'interconnexion « uni-

verselle » ouvre en effet des perspectives intéressantes à étudier, tout en offrant une nouvelle offre de services logistiques, à l'image de l'Internet en tant qu'une interconnexion universelle des réseaux informatiques [Sarraj *et al.*, 2012].

Par la suite, on va présenter la structure de l'Internet physique telle qu'elle est proposée par ([Ballot *et al.*, 2014] ; [Montreuil, 2009] ; [Montreuil, 2012] ; [Montreuil *et al.*, 2012] et [Montreuil, 2011]).

## 2.4.2 Structure de PI

Afin de réaliser ses objectifs, la vision de PI repose sur trois composantes clés, éléments fondamentaux pour créer l'interconnexion entre les services logistiques de transport, de stockage, etc.

- **$\pi$ -conteneurs** : leur rôle consiste à protéger les produits, représenter un espace privé, fournir une interface normalisée (c'est-à-dire communication et physique) avec le système logistique. C'est la composante clé de l'interopérabilité du réseau PI (c'est-à-dire "Web Logistics" basés sur le transport intermodal). Concernant notre travail, les  $\pi$ -conteneurs seront utilisés lors des opérations logistiques et de transport effectuées dans les réseaux HCL. Un exemple de  $\pi$ -conteneur est indiqué dans la figure 2.2;

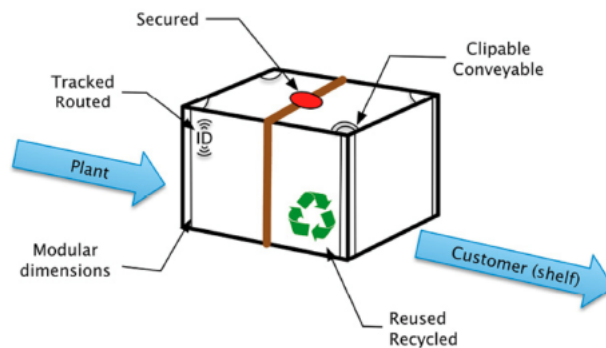


Figure 2.2 Modèle d'un  $\pi$ -conteneur. Source: [Ballot *et al.*, 2014]

- **$\pi$ -protocoles** : leur rôle consiste à définir les opérations qu'il faut réaliser, ainsi que les conditions à respecter. Afin d'exploiter les différents services dans un réseau interconnecté, chaque partie prenante doit observer un ensemble de règles professionnelles (les protocoles). De cette façon, les services peuvent être structurés en couches selon

des protocoles normalisés et standardisés. Les  $\pi$ -protocoles font, également, partie des concepts clés de la logistique urbaine hyperconnectée. Étant donné que les services d'Internet numérique ont été structurés en sept couches selon le modèle de référence OSI "Open System Interconnection", les services PI sont structurés suivant le modèle de référence "Open Logistics Interconnection" (OLI), illustré ci-après à la figure 2.3;

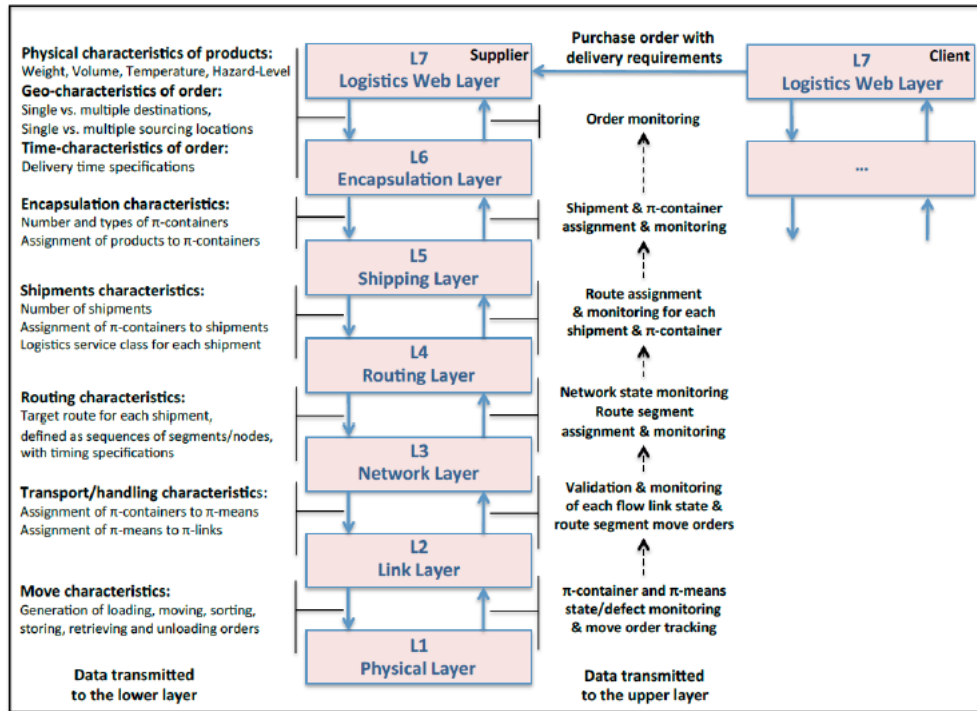


Figure 2.3 Modèle de référence de "Open Logistics Interconnection" (OLI). Source: [Montreuil *et al.*, 2012]

- **$\pi$ -hubs** : leur rôle consiste à limiter le stockage dans les installations de transbordement, tout en acheminant directement chaque expédition de tailles appropriées aux clients (transport direct). Les  $\pi$ -hubs sont des éléments clés dans les réseaux HCL. Ils sont équivalents aux installations satellitaires présentées dans le cadre étudié. La figure 2.4 illustre la conception d'un route-rail  $\pi$ -hub;

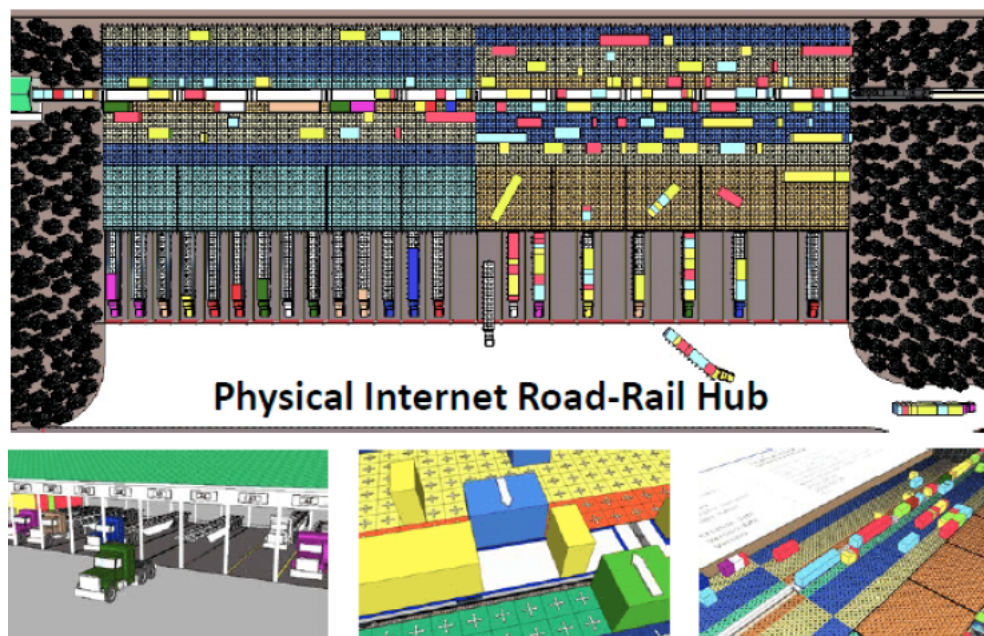


Figure 2.4 Modèle de route-rail  $\pi$ -hub . Source: [Montreuil *et al.*, 2012]

De plus, la PI donne un Web Logistique "logistics web" composé de 5 couches / modules. Dans notre travail, on s'intéresse principalement aux couches de distribution et de mobilité. À ce niveau, La PI met l'accent sur les concepts de mutualisation et de coopération et les protocoles de collaboration dans le système. On peut définir l'IP comme étant une mutualisation à une grande échelle [Montreuil *et al.*, 2012].

- **Open global Distribution web** : l'idée de ce type de réseau est basée sur le fait que la plupart des entreprises conçoivent, gèrent et optimisent indépendamment leurs réseaux de distribution privés, investissent dans des centres de distribution ou s'engagent dans des contrats à long terme. Avec un réseau de distribution PI, chaque entreprise pourrait déployer ses produits et sa marchandise à travers un réseau ouvert de multiples centres de distribution [Montreuil, 2012];
- **Open global Mobility web** : l'idée est de changer la conception des réseaux de services de transport "point-to-point" ou "hub-and-spoke" à un réseau de service de transport multimodal. Dans un "Mobility web", un conteneur modulaire peut effectuer des opérations de transport à partir d'une origine à une destination en utilisant des itinéraires et routes multi-segments [Montreuil, 2012].

### 2.4.3 Applications et perspectives

Afin de prouver l'efficacité de PI jusqu'à l'heure actuelle, plusieurs études ont simulé des comportements de réseaux PI. Les résultats des simulations prouvent, généralement, une influence positive et une amélioration remarquable des performances logistiques et de transport.

On peut citer l'exemple de l'étude effectuée par [Montreuil, 2011], qui permet de simuler les avantages et les gains potentiels d'une conception de réseau PI dans l'industrie française du commerce de détail. Dans cette recherche, les auteurs ont supposé que les deux grandes entreprises du secteur, "Carrefour" et "Auchan", ont décidé de collaborer au niveau du partage de l'information ; rassembler les commandes et les livrer à un échantillon de 100 fournisseurs. Par ailleurs, ils ont supposé avoir un réseau PI déjà mis en place, ce qui implique qu'un ensemble de transporteurs opère d'une manière collaborative pour optimiser les mouvements de fret en matière de coûts, de facteur de charge et de délai de livraison. Les résultats de la simulation préliminaire sont présentés à la figure 2.5 [Montreuil *et al.*, 2012];

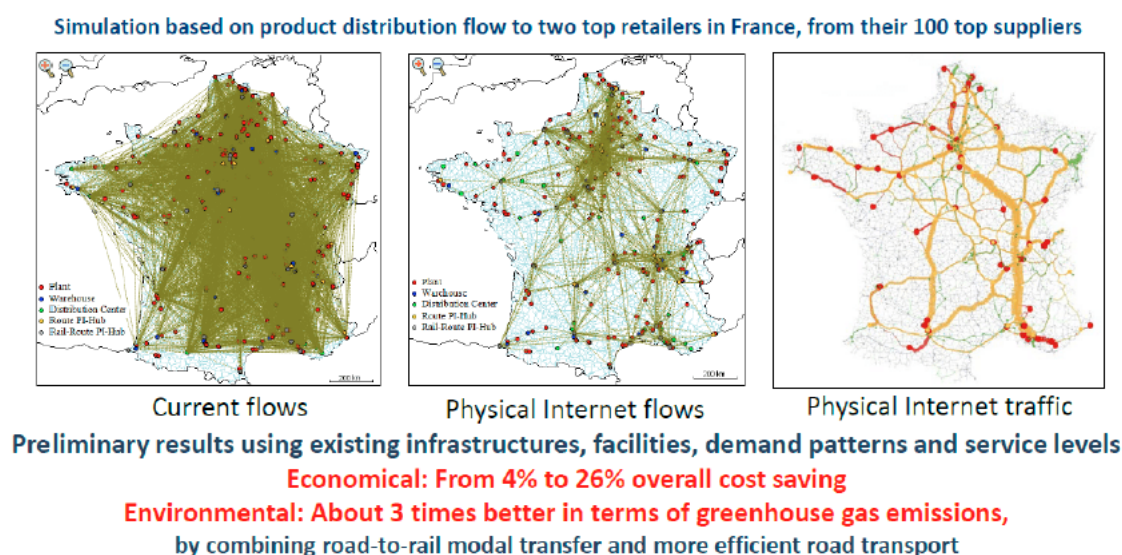


Figure 2.5 Résultats préliminaires de la simulation de réseau de distribution PI en France.  
Source: [Montreuil *et al.*, 2012]

Malgré les nombreuses recherches et études effectuées sur le concept d'Internet Physique, néanmoins, il demeure un concept récent et innovant qui a besoin d'être plus développé en profondeur, jusqu'à maintenant, seulement quelques principes fondamentaux ont été énoncés. De plus, jusqu'à maintenant, aucun développement de modèles de planifications de système logistique de la PI n'a pas été proposé. Dans notre travail, on va combler ces lacunes en

introduisant des modèles de planification tactique pour le système de la logistique urbaine hyperconnectée et mutualisée, basé sur la logistique urbaine et l’Internet Physique et proposé par [Crainic et Montreuil, 2016].

## 2.5 Discussion

En évaluant la littérature scientifique sur la collaboration dans la logistique, on remarque que la plupart des travaux se concentrent principalement sur les collaborations à une dimension, soit verticale ou horizontale. Récemment, les travaux ont commencé à considérer des modèles plus avancés et plus complexes, se basant sur les systèmes collaboratifs à deux dimensions. Ces modèles combinent les deux stratégies collaboratives : verticales et horizontales.

Concernant la logistique urbaine, la création de nouveaux systèmes logistiques collaboratifs semble aller au-delà des concepts déjà exprimés et étudiés dans la littérature. L’ajout et l’incorporation de plusieurs concepts des systèmes logistiques collaboratifs (tels que : différentes entités participantes, plateformes logistiques collaboratives, différentes formes de partage de ressources, la gestion commune, etc.) dans un système de logistique, plus englobant, permet de pousser la coopération à des niveaux plus élevés de performance et de sophistication, surtout, en tenant compte de la complexité de la logistique urbaine.

Afin de mettre en œuvre les principes fondamentaux de ces paradigmes, le fait d’appliquer les modèles traditionnels de la logistique collaborative, unidimensionnelles ou bidimensionnelles, ne sera pas suffisant. Dans ce concept, il faut appliquer une mise en œuvre simultanée, interactive et révolutionnaire de ces modèles classiques. Ce défi, entraîne l’apparition d’un nouveau modèle logistique collaboratif, caractérisé par une grande complexité surtout en tenant compte des spécificités et de l’interconnectivité des réseaux de transport de marchandises en ville.

Dans ce travail, on propose de structurer et planifier un nouveau système logistique : le réseau hyperconnecté de transport de marchandises en ville (HCL : Hyperconnected City Logistics). Ce système permet d’améliorer l’efficacité et la performance de transport de marchandises en ville, tout en tenant compte des spécificités fondamentales de la logistique urbaine, de l’Internet Physique et de la logistique collaborative.

## 2.6 Les objectifs de la recherche

La problématique de recherche principale posée dans ce travail est le développement de modèles d’optimisation afin de préparer une planification tactique de réseaux de la logistique ur-



baine hyperconnectée et mutualisée permettant aux différentes parties prenantes d'atteindre leurs objectifs. On met l'accent particulièrement, sur les modèles organisationnels, tels que l'Internet physique et la logistique urbaine.

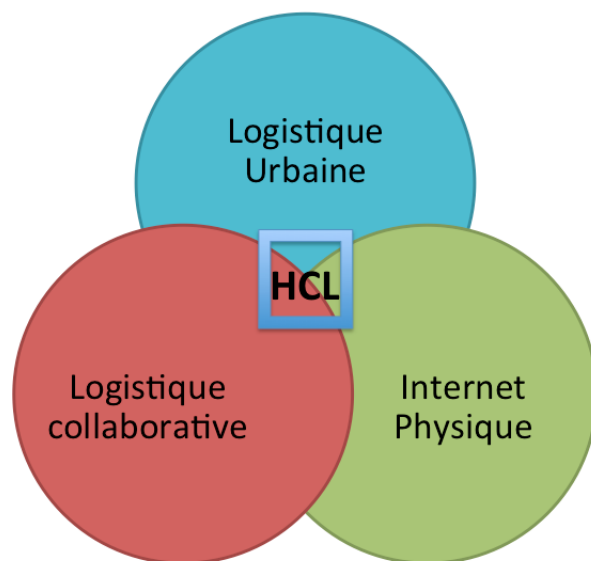


Figure 2.6 HCL: Le système de la logistique urbaine hyperconnectée

Concernant les objectifs spécifiques, on propose une planification tactique liée à la conception et à la gestion du réseau de service hyperconnecté permettant d'affecter et gérer les différentes ressources, de déterminer les services de transport et d'assurer le partage des ressources et des coûts entre les acteurs collaborateurs dans un cadre multimodal. On propose, aussi, une formulation de programmation en nombres entiers pour le problème intégrant le concept de la mutualisation, la gestion et le partage des ressources et des coûts. De plus, on évalue la façon dont un système de la logistique urbaine hyperconnectée peut être rentable en introduisant le concept de la mutualisation entre de nombreux acteurs logistiques (transporteurs) avec le partage des ressources. De plus, dans notre modèle, on modélise les ressources, comme la taille des flottes de véhicules et la capacité des installations utilisées. On considère dans notre problématique non seulement les camions, mais, aussi d'autres modes de transport, tel que les tramways.

Nos contributions permettent de combler certaines lacunes des systèmes traditionnels et d'ouvrir de nouveaux horizons de recherche plus adaptés aux exigences actuelles et futures de transport de marchandises en ville en termes écologique, économique et social.

## CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DU SYSTÈME DE LA LOGISTIQUE URBAIN HYPERCONNECTÉE (HCL)

### 3.1 Introduction

L'application des concepts de l'Internet physique à l'environnement urbain fait apparaître un nouveau paradigme qu'on appelle "la logistique urbaine hyperconnectée" (HCL). C'est un cadre conceptuel riche qui permet la conception de systèmes logistiques urbains significativement plus efficaces et durables.

Le système HCL a été introduit en 2016 par [Crainic et Montreuil, 2016]. Jusqu'à maintenant, aucune stratégie de planification n'a été proposée et plusieurs aspects de ce système ne sont pas encore étudiés. Notre travail prend en compte de nouvelles réalités par rapport à la littérature (chapitre 2).

L'idée fondamentale d'un système HCL est de ne pas considérer le transport de marchandises en ville, les parties prenantes, les éléments matériels et les activités individuellement, mais, comme étant des composantes d'un système de logistique mondial, ouvert et fondé sur l'interconnectivité physique et numérique par encapsulation, protocoles et interfaces pour une efficacité et une durabilité accrues [Crainic et Montreuil, 2016]. De plus, un système hyperconnecté permet d'organiser et d'optimiser les flux de transports, tout en introduisant les concepts de coopération et de collaboration hyperconnectée entre les acteurs (les transporteurs pour notre travail). Cela permet de réduire considérablement les transports à vide, les coûts de transport, le chevauchement des flux, etc.

Dans ce chapitre, on décrit le système et on présente le contexte HCL à travers plusieurs caractéristiques importantes: les parties prenantes, le modèle de collaboration, le fonctionnement du système, les acteurs collaborateurs, etc. On identifie, également, les concepts de base du système HCL proposé et on illustre une organisation/structure possible.

### 3.2 Les parties prenantes

Plusieurs types d'organisations, d'institutions (privées, publiques ou semi-publiques) et de personnes peuvent être impliquées dans un système de logistique urbaine hyperconnectée. Chaque partie prenante possède ses propres objectifs, intérêts et limites. Certaines peuvent participer directement au projet et faire partie de la prise de décision, par exemple les transporteurs collaborateurs, l'entité gérante, etc., tandis que d'autres (les citoyens, le gou-

vernement, etc.) peuvent être touchées par les conséquences de mise en place des activités d'un tel système. Elles peuvent, également, participer directement ou indirectement aux différentes activités (lois, votes, etc.). On cite, spécifiquement, les parties prenantes impliquées dans le cadre de cette étude :

- **Le gouvernement** : c'est un ensemble d'institutions publiques (les gouvernements nationaux, régionaux, municipalités, etc.) qui se chargent de mettre en place les lois et les règlements afin de structurer et cadrer les différentes activités économiques, environnementales et sociales liées au transport de marchandises en ville.

Ainsi, son principal objectif économique consiste à réduire les impacts des coûts logistiques sur le PIB, à créer des avantages concurrentiels, à augmenter le nombre de transactions/activités et à faciliter les investissements. Son objectif environnemental consiste à réduire les impacts négatifs des activités logistiques dans la ville tels que la pollution, la congestion, etc. Concernant ses objectifs sociaux, on peut citer l'amélioration de la qualité de vie dans la ville, la création de nouvelles embauches, l'amélioration des conditions des travailleurs, etc.

Généralement, les gouvernements peuvent être actifs dans l'analyse des problèmes et encouragent la mise en œuvre de solutions efficaces. Dans le cas d'un système HCL, les gouvernements peuvent jouer un rôle important dans la mise en place de l'interconnectivité universelle proposée par PI en général et HCL en particulier. Surtout, les systèmes de transports hyperconnectés permettent à ces institutions d'atteindre leurs objectifs et de résoudre les problèmes liés aux impacts négatifs de transport de marchandise.

Typiquement, les entités publiques ont pour rôle de déterminer les politiques et les règlements fixant les limites dans lesquelles les activités logistiques peuvent être exécutées (par exemple, les accords de libre-échange, la législation du travail, les normes technologiques, etc.). On peut différencier trois types d'entités publiques :

- Entités gouvernementales (internationales, nationales, régionales, locales, etc.);
  - Organismes publics chargés de percevoir les impôts au nom des entités gouvernementales (par exemple, les douanes);
  - Autorités publiques chargées de proposer des règles et des politiques relatives à des secteurs et processus logistiques spécifiques (autorités dans les ports, autorités de la réglementation de transport, etc.);
- **Les expéditeurs** : ils sont parmi les plus importants acteurs et sont toujours impliqués dans les systèmes logistiques. De nos jours, ils sont de plus en plus présents et influents

dans les processus de prise de décision. Les expéditeurs peuvent bénéficier des avantages des systèmes HCL puisque leur défi consiste à pouvoir offrir à leurs clients des quantités d'expédition plus économiques avec des délais plus courts et des fréquences accrues. Cela devrait contribuer non seulement à la réduction des stocks, mais également à l'amélioration des services à la clientèle;

- **Les transporteurs** : ils sont des entreprises, privées ou publiques, chargées de déplacer physiquement les marchandises d'un point d'origine (par exemple, une usine, un entrepôt, un terminal) à un point de destination (par exemple, une usine, un entrepôt, un terminal, un client). Une distinction entre les transporteurs de marchandises peut être basée sur trois critères : la propriété de la flotte, la distance parcourue et le type de services fournis. En particulier, une première distinction concerne la propriété de la flotte, c-à-d, si les expéditeurs possèdent et exploitent leur flotte (on parle alors de la flotte propriétaire) ou externalisent les tâches de transport à des transporteurs spécialisés (transporteurs pour compte d'autrui). Deuxièmement, les transporteurs peuvent effectuer des trajets interurbains (longues distances, peu de points visités, un ou plusieurs jours de voyage) ou urbains (c'est-à-dire de courtes distances, itinéraires de ramassage et de livraison desservant plusieurs clients en une journée). Enfin, les transporteurs de fret peuvent fournir des services de transport personnalisés ou des services de transport avec consolidation. Concernant les services personnalisés, le véhicule est dédié à la demande d'un seul client (l'expéditeur) et effectue un service porte-à-porte entre l'expéditeur et le client. Pour le cas des services de transport avec consolidation, les charges de plusieurs clients sont regroupées dans un même envoi et se déplacent ensemble sur le même véhicule / convoi. Les transporteurs individuels ou groupés et les entreprises d'entreposage sont des acteurs très importants dans la logistique urbaine hyperconnectée. Ils influencent directement le système de transport dans les aires urbaines. Les transporteurs sont des acteurs clés dans les systèmes HCL. Ce système offre la possibilité de créer un réseau hyperconnecté et partagé par plusieurs transporteurs de façon à ce que les ressources puissent être mieux utilisées et gérées. Cela offre un potentiel de revenus supplémentaires, une diminution des coûts et un meilleur service client;
- **L'entité gérante** : dans la littérature, plusieurs types et formes de collaborations ont été étudiés [Crainic, T.G. et Laporte, G., 1997]. Concernant le niveau décisionnel, on distingue deux types de collaborations :

1. Planification coordonnée : les acteurs impliqués s'engagent à planifier une vision opérationnelle commune, référée à une ou plusieurs tâches métiers. Par con-

séquent, chaque acteur harmonise ses plans individuels par rapport à la vision commune ;

2. Planification intégrée : les acteurs concernés s'engagent à intégrer les processus de planifications individuels respectifs, agissant ainsi comme une organisation unique. Jusqu'à présent, cette forme de collaboration n'a presque aucune application réelle, sauf dans le cas de fusions et d'acquisitions.

Dans notre travail, on étudie le concept de la planification intégrée qui répond aux caractéristiques de système HCL collaboratif présenté. Pour cela, on présente l'entité gérante comme étant l'entité responsable de la gestion de différents types de ressources, appartenant à une coopération, telles que les flottes de véhicules et les infrastructures logistiques dédiées au stockage, au transbordement, etc. Au niveau stratégique, l'entité décide la répartition des parts des différents acteurs collaborateurs en fonction de leurs contributions dans la coopération (capacité proposée, flottes de véhicules et ressources mises en commun, etc.). Un processus de prise de décision centralisé au niveau tactique et opérationnel doit être mis en place, exigeant que les membres de la mutualisation partagent leurs propres ressources afin de satisfaire les demandes des clients. Dans le cadre de système HCL proposé, l'entité gérante a également plusieurs rôles dans la réglementation et l'organisation de la mutuelle. On peut citer : assurer la protection et la primauté des intérêts de tous les partenaires et respecter la réglementation et les règles de partage applicables; gérer le portefeuille de la mutuelle; mettre en œuvre et appliquer des dispositions organisationnelles et administratives qui visent à prévenir les conflits entre les différents acteurs et à gérer les cas avérés de désaccord; gérer les contrats et les différentes activités professionnelles, financières, administratives et judiciaires; surveiller, en permanence, les activités effectuées afin de s'assurer que les procédures et les réglementations internes sont respectées par tous les associés; mettre en place une politique interne de gestion des ressources, des intérêts et des conflits, qui comporte des instructions et des réglementations strictes et rigides que les collaborateurs doivent respecter afin d'assurer les intérêts de la mutuelle; appliquer une politique relative à la confidentialité qui permet de s'assurer que les informations confidentielles obtenues lors des activités professionnelles de la mutuelle ne sont utilisées qu'aux avantages du groupe; développer des procédures prévoyant la transmission rapide des situations de conflits, désaccords ou problèmes qui nécessitent une solution ou une décision; former les collaborateurs en termes de connaissance de leurs responsabilités, leurs droits et leurs obligations. La coordination, la neutralité et le contrôle continu sont des conditions importantes pour le bon déroulement et la réussite d'une approche mutualisée;

- **Les clients** : dans le système de la logistique urbaine hyperconnectée, les clients de chaque transporteur collaborateur seront considérés comme des portefeuilles de clients mis en commun dans la coalition. Autrement dit, chaque client peut être desservi par n'importe quel transporteur de la coalition. La marchandise est stockée, manipulée et transportée par des ressources (véhicules, transporteurs, infrastructures, etc.) partagées entre les transporteurs collaborateurs. Les systèmes HCL sont avantageux pour les clients surtout avec les délais plus courts, les fréquences de livraison accrues, l'amélioration des services, la diminution des coûts et la réduction des impacts négatifs (pollution, bruit, circulation, etc.).

### 3.3 L'hyperconnexion dans un système HCL

Dans cette section, on identifie les concepts de base des systèmes HCL et on illustre une organisation possible. En se basant sur la définition de système HCL proposée par [Crainic et Montreuil, 2016], on distingue neuf concepts fondamentaux liés à notre système HCL mutualisé. Ces concepts permettent de mettre en avant la différence entre un système HCL et les systèmes logistiques traditionnels.

1. **Interconnecter les villes en tant que nœuds du réseau logistique mondial** : avec la mise en place d'un système HCL, la ville devient fortement interconnectée avec le reste du monde. On considère la ville comme étant un nœud dans un réseau, logistique et de transport, global (régional, national et international), formant le "*World Logistics Web*". L'interconnexion, avec d'autres villes et régions, est une clé fondamentale pour la performance de la ville en matière de logistique et de transport. Dans notre travail, afin d'illustrer cette hyperconnexion, on considère un trafic commercial passant par et à travers la ville, utilisant les infrastructures routières, intermodales et multimodales telles que les centres de distribution urbains (CDU) qui constituent des nœuds de la HCL de la ville;
2. **Interconnecter les villes par la standardisation des systèmes**: dans les différents systèmes logistiques, on considère chaque ville comme étant unique, ce qui permet de concevoir un réseau logistique adapté à ses spécificités. Cependant, afin d'assurer l'hyperconnexion des réseaux, il est essentiel d'exploiter des encapsulations, des protocoles et des interfaces, standardisés mondialement. En effet, la plupart des grands acteurs d'un système logistique d'une ville (transporteurs, expéditeurs, etc.) font affaire, aussi, avec d'autres villes. Pour cela, la standardisation permet d'organiser, de réglementer et de faciliter les différentes opérations et tâches. La standardisation

touche le niveau numérique (données, transactions, suivis, etc.), le niveau physique (emballages, installations, véhicules, etc.), le niveau opérationnel (par exemple, les activités réelles dans les installations), ainsi que le niveau d'affaires (par exemple, transactions et contrats). La recherche d'une standardisation complète ne sera pas simple, car il existe de nombreuses différences culturelles (au sens large: politiques, sociales, commerciales, etc.) entre les villes et les pays du monde. Pourtant, le transport intermodal par conteneur, l'échange de données informatisées et les systèmes de transport intelligents ont déjà fait l'objet de nombreuses mesures de normalisation. Afin d'intégrer ce niveau d'interconnexion, on considère que la marchandise sera encapsulée dans des  $\pi$ -conteneurs modulaires standardisés. Cela permet de protéger la marchandise, d'assurer sa traçabilité et d'augmenter le taux de charge des véhicules. De plus, on considère des " $\pi$ -hubs" qui sont des infrastructures permettant de limiter le stockage dans les installations de transbordement, tout en assurant l'acheminement direct de chaque expédition aux clients finaux (transport direct). Dans notre système, les  $\pi$ -hubs sont appelés "satellites";

3. **Interconnecter les différentes activités de la logistique urbaine:** la logistique urbaine est basée sur la vision de traiter les différentes activités de transport de marchandises en ville comme un système, pour la plupart, concentré uniquement sur le transport. La logistique urbaine hyperconnectée va au-delà de cette perspective pour adopter une perspective du système logistique complet englobant la manière dont les objets physiques sont déplacés, stockés, réalisés, fournis et utilisés. Cela va au-delà des activités de transport, de transbordement et de manutention, pour inclure les activités d'approvisionnement, de stockage et de déploiement. Dans notre système, cette perspective est traduite par le partage des capacités résiduelles des flottes de véhicules appartenant à des transporteurs collaborateurs. De plus, on considère le partage des capacités de stockage des installations logistiques (CDU et satellites), non seulement pour le stockage et la distribution de marchandise, mais aussi, pour les activités de transbordement. La mise en commun des installations et des flottes a un impact positif important sur l'utilisation des véhicules de fret, le routage, l'ordonnancement et, ainsi, la HCL en général;
4. **Interconnecter les réseaux logistiques des villes dans une architecture "Web" de la ville:** les architectures des systèmes de logistiques urbaines actuellement étudiées et mises en œuvre, sont plutôt strictes en termes d'organisation logistique. La plupart du temps, dans les systèmes logistiques urbains traditionnels, on a un ou deux niveaux d'installations logistiques et les flottes de véhicules utilisées appartiennent, générale-

ment, au mode routier et se concentrent sur une zone particulière de la ville. Par contre, la logistique urbaine hyperconnectée est basée sur une architecture de réseau ouverte et sous forme de web. Dans notre travail, on considère le système HCL comme étant un réseau multizone, multimodal (camions urbains et trams), ayant des centres logistiques urbains (CDU) considérés comme des nœuds d'interconnexion des réseaux logistiques et des voies multimodales (routes terrestres et lignes de trams) servant pour le transport de flux;

5. **Interconnecter la multiplicité des centres logistiques urbains:** la plupart des initiatives de la logistique urbaine envisagent d'exploiter une ou plusieurs installations logistiques, par exemple, en mettant l'accent sur la mise en place d'un centre de distribution urbain. L'idée de la logistique hyperconnectée est d'utiliser la capacité de multiples installations lorsqu'elles sont disponibles. La HCL a adopté une perspective plus ouverte et plus globale que les systèmes logistiques traditionnels. Plutôt que de se limiter à l'utilisation de nouveaux CDU, HCL met l'accent sur l'utilisation interconnectée de différentes sortes d'installations logistiques urbaines et d'espaces utilisables, y compris les centres de distribution publics et privés, les plateformes et entrepôts, les hubs, les dépôts de véhicules, les terminaux des lignes de trams, les espaces et les installations de stationnements publics et privés, les installations postales, etc;
6. **Interconnecter les acteurs de la logistique urbaine dans un système ouvert:** la logistique urbaine hyperconnectée est un système ouvert impliquant plusieurs acteurs qui contribuent à la performance globale du système, tout en visant leurs propres objectifs. Sur le plan opérationnel, le réseau de la logistique urbaine nécessite de nombreux prestataires de services multimodaux, de logistique et de transport, pour coopérer et assurer la consolidation et la synchronisation. En matière d'affaires, il s'agit d'un arrangement contractuel entre les différents acteurs, notamment en termes de tarification, de niveau de service, de responsabilité, d'assurance dans un contexte de risques distribués, de coûts, de revenus et de profits, ouvrant la voie à des nouveaux modèles économiques hyperconnectés. En matière de service public, il s'agit de faire interagir les autorités avec les autres acteurs de la logistique urbaine afin de mettre en place et de faire respecter l'environnement, en termes de législation, de réglementation et de politique au niveau national et international ainsi que dans les zones urbaines;
7. **Interconnecter les marchandises à travers des conteneurs logistiques modulaires:** la conception de nouveaux conteneurs de fret normalisés mondialement offre une manipulation sécuritaire et efficiente pour la plupart des produits dans le transport de marchandises à longue distance. La littérature scientifique et la pratique de



la logistique urbaine ont beaucoup de limites concernant la façon de déplacer et de stocker les marchandises dans les zones urbaines. Pour répondre à ces limitations, l'Internet Physique suggère d'encapsuler la marchandise dans des  $\pi$ -conteneurs standardisés, intelligents, modulaires et respectant l'environnement. Les  $\pi$ -conteneurs ont plusieurs dimensions allant de la taille de petites boîtes à la taille des conteneurs. La communauté de la recherche et de l'innovation de l'IP conçoit activement la première génération des  $\pi$ -conteneurs. Dans notre travail, la logistique urbaine hyperconnectée considère l'interconnexion universelle comme étant primordiale, donc la marchandise sera stockée dans des  $\pi$ -conteneurs. Ces derniers sont utilisés lors du stockage et du transport des frets. Cela permet d'assurer la protection des marchandises et de faciliter le transport et la circulation des frets dans les aires urbaines;

8. **Interconnecter la mobilité des personnes et la logistique des marchandises dans la ville:** dans la littérature scientifique de la logistique urbaine, on remarque une séparation (souvent, légalement imposée) entre la mobilité des personnes et le transport de marchandises. Par contre, la HCL met de l'avant le concept d'interconnexion entre la mobilité des personnes et le transport de fret. HCL vise, fondamentalement, à exploiter la synergie entre les flottes et les infrastructures logistiques publiques (actuellement dédiées à la mobilité des personnes) et privées (généralement utilisées pour le transport de marchandises). Ce concept vise à mettre en place un système logistique innovateur permettant d'assurer un transport de marchandises et de personnes commun, sécurisé, sûr et efficace. Pour étudier l'importance et l'impact de cette approche, dans notre travail, on considère deux modes de transport, les camions urbains et les tramways. Pour cela, dans notre système de transport hyperconnecté, on a inclus l'exploitation des lignes régulières et des stations des tramways pour manipuler et transporter la marchandise. Quelques wagons de trams sont utilisés pour le transport de fret hors des heures de pointe et lorsque le trafic de mobilité des personnes est faible;
9. **Interconnecter la logistique urbaine avec la planification urbaine:** les activités de transport et de la logistique sont fortement liées avec les autres activités de la ville. La prise en compte de ces interactions, afin de diminuer les impacts négatifs de transport urbain de marchandises sur la ville, est un objectif prioritaire de la logistique urbaine en général et de HCL en particulier. De plus, les politiques d'aménagement urbain et d'utilisation des infrastructures ont un impact considérable sur la performance de la logistique hyperconnectée. Ces faits soulignent la nécessité d'une vision globale qui relie le transport de marchandises et des personnes et la logistique aux réseaux d'activités plus vastes de la ville.

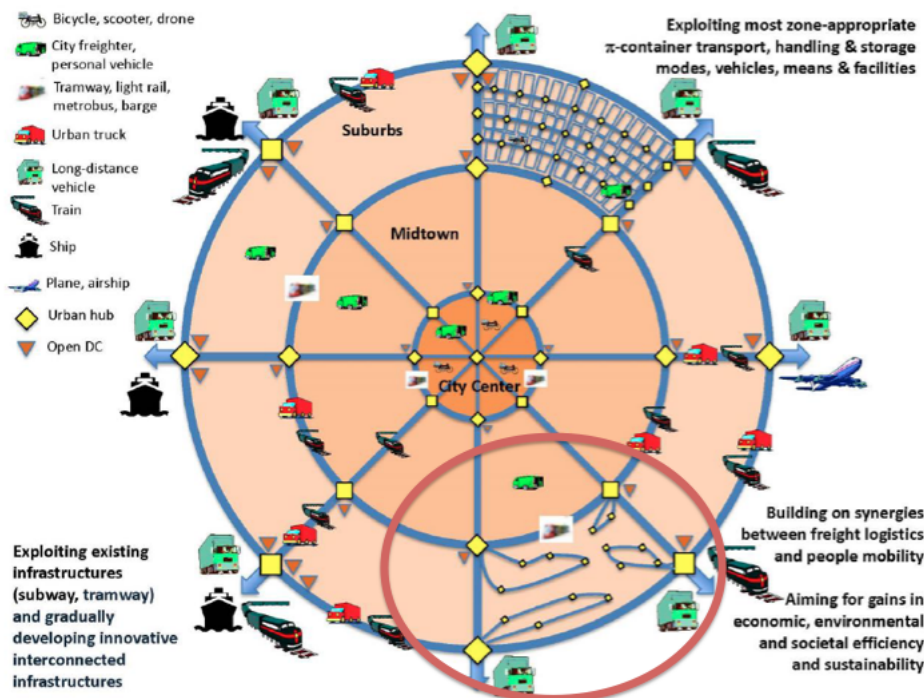


Figure 3.1 Illustration d'un réseau HCL [Crainic et Montreuil, 2016]

La figure 3.1 illustre une composition et structure possible d'un système de la logistique urbaine hyperconnectée. Le type et le nombre de composantes d'un système HCL sont spécifiques à la ville étudiée et à ses caractéristiques. Ici, la ville est esquissée à l'aide de trois anneaux concentriques correspondant à ses trois niveaux : périphérie de la ville, zones intermédiaires et centre-ville. Il y a un anneau extérieur avec un ensemble d'infrastructures urbaines multimodales situées à des endroits stratégiques tels que les passages à niveau, les aéroports et les ports maritimes à proximité, les gares de triage, etc. À proximité, on trouve les centres de distribution urbains qui reçoivent, trient, transbordent, consolident et expédient les flux de marchandises entrants et sortants de la ville et encapsulés dans des  $\pi$ -conteneurs. Dans cette étude on s'intéresse, spécifiquement, à la planification tactique de premier niveau (entre les CDU et les satellites : cercle rouge dans la figure). Dans les sections suivantes, on explique avec plus de détails les caractéristiques spécifiques au système HCL étudié.

### 3.4 Fonctionnement et structure du système HCL

Comme on l'a expliqué précédemment, le but principal de notre recherche consiste à modéliser un système de logistique urbaine hyperconnectée. Afin d'atteindre nos objectifs, on va faire

appel à un système de distribution de marchandises à deux niveaux pour les zones urbaines congestionnées (le cadre proposé dans Crainic et al. 2009), en utilisant des centres de distribution comme un premier échelon du système et des petites plateformes appelées *satellites* (le deuxième niveau) comme des points intermédiaires pour la distribution de marchandises. Ce système construit et développe l'idée de consolidation et coordination des mouvements de transport de marchandises et des acteurs (transporteurs) dans les aires urbaines. Son objectif principal est de diminuer le nombre de véhicules de fret qui circulent dans les zones urbaines par une utilisation plus efficace de leur capacité.

Le système proposé est un système de la logistique urbaine hyperconnectée à 2-niveaux. Le premier volet du système consiste à utiliser les CDU qui forment le premier niveau du système et qui se localisent généralement en périphérie de la ville. Dans ces plateformes, les marchandises en provenance de différents expéditeurs sont colletées, triées et enfin consolidées dans des camions urbains (communs) adaptés pour circuler dans les zones urbaines, tout en maximisant l'utilisation de leurs capacités. Dans le système proposé, les CDU peuvent exercer des activités de stationnement et d'entreposage intermédiaire. Dans ce niveau, les camions urbains utilisent des routes sélectionnées dans une tournée optimisée afin de faciliter leur circulation et réduire leur impact sur la circulation et l'environnement. Puisque l'objectif principal est de minimiser la circulation des véhicules de transport de marchandises dans les zones urbaines denses, plusieurs règles peuvent être imposées. La marchandise est transportée au départ des CDU dans les camions urbains vers *des plateformes satellitaires* qui constituent le deuxième volet du système. Dans ces plateformes, les charges provenant directement des CDU ou d'autres satellites seront déplacées directement dans des "*city-freighters*" qui assureront la distribution des marchandises en provenance des satellites vers les clients finaux. Les "*city-freighters*" sont des véhicules économiques, écologiques et à faible capacité. Ils peuvent être de différents types, en termes d'émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) (différents taux d'émissions suite à plusieurs facteurs comme le type et l'état du véhicule, le type du carburant utilisé, etc). Notons que l'utilisation des véhicules plus propres écologiquement pour la livraison finale permet de diminuer l'impact sur l'environnement.

Dans le cadre proposé, on considère une offre de transport comme étant la mise à disposition de plusieurs flottes de véhicules et des chauffeurs dans une fenêtre de temps. Plusieurs transporteurs peuvent partager leurs ressources et leurs flottes de véhicules, cela permet d'augmenter considérablement le facteur de charge des véhicules de distribution urbaine de marchandises. Afin d'intégrer l'ensemble des ressources disponibles sur l'espace urbain considéré dans notre projet, plusieurs types de flottes de véhicules avec des caractéristiques différentes (capacité, poids, émissions, etc.) seront utilisés (camions urbains, trams et "*city-freighters*"). Donc, le problème présenté est de nature multimodale. Concernant les offres

de stockage, elles seront considérées au premier niveau, dans les CDU. Par contre, au deuxième niveau, les satellites n'offrent pas le service d'entreposage. Dans ce niveau, on impose un transfert direct de marchandises d'un véhicule à un autre. Dans le cadre proposé, on définit une demande d'un service logistique comme l'acheminement d'une certaine quantité de marchandises à partir d'un point de départ CDU vers un point de livraison en passant par des installations intermédiaires (satellites) sous des contraintes horaires (les fenêtres de temps). Une demande consiste à faire entrer et transiter la marchandise en ville. On considère que les produits, transportés dans un même véhicule ont les mêmes caractéristiques (pas de traitement spécifique). Chaque demande est contenue dans un  $\pi$ -conteneur et ne peut pas être séparée en plusieurs produits.

D'un point de vue fonctionnel, les camions urbains et les "*city-freighters*" qui transportent la marchandise au premier et au second niveaux, respectivement, se rencontrent dans les satellites à des périodes bien précises, avec des temps d'attente très courts. Les charges seront déplacées directement à partir du véhicule urbain aux "*city-freighters*" appropriés, sans la possibilité du stockage intermédiaire. Les satellites opèrent selon la synchronisation des véhicules et un modèle de transbordement cross-docking. Les technologies de Systèmes de Transport Intelligents (STI) seront utilisées afin de contrôler et coordonner les véhicules et les différentes opérations en temps réel. La synchronisation entre les différentes activités de chargement et de déchargement permet de limiter les pénalités, le dépassement des délais de livraison ou encore le manque de stationnement dans les plateformes. Les camions urbains pouvant visiter plusieurs satellites durant la même tournée, leurs itinéraires et heures de départ doivent être optimisés et coordonnés avec l'accès aux satellites et avec la disponibilité des *city-freighters*.

En évaluant le système d'un point de vue physique, le processus fonctionne comme suit: la marchandise arrive à une zone externe où elle sera consolidée dans des camions urbains. Chaque véhicule, à charge pleine, reçoit une heure de départ, des itinéraires et un ensemble de satellites à visiter. Il décharge le fret, ensuite soit il quitte le système, soit il se rend à une zone externe spécifique et attend sa prochaine tournée. Dans notre modèle le temps de chargement et de déchargement seront pris en compte. Au niveau des satellites, la marchandise est transférée dans des "*city-freighters*". Chaque "*city-freighter*" fait une tournée afin de servir des clients désignés, puis il se rend à un satellite pour commencer ses prochaines opérations. Le "*city-freighter*" se rend à un dépôt (garage des "*city-freighters*", installations existantes, stationnements municipaux, etc.) lorsque le dernier client est servi et qu'il ne reste plus d'opérations prévues pour la période désignée.

En analysant le système d'un point de vue informationnel et décisionnel, le processus com-

mence par la demande de distribution des marchandises dans les zones urbaines. La consolidation du fret donne la demande réelle pour le transport par les camions urbains et pour les activités de transfert de "*cross-docking*" dans les satellites, qui génèrent les inputs de la circulation des "*city-freighters*". L'objectif est d'avoir des véhicules de transport de marchandises dans les zones urbaines juste au besoin tout en assurant l'efficacité du service et le respect des délais de livraison et des contraintes écologiques.

### 3.5 Étude de la collaboration dans le système HCL

Notre projet correspond à une planification tactique d'un système de transport de marchandises à deux niveaux avec consolidation, où les CDU, les satellites, les *city-freighters* et les véhicules urbains sont les ressources qui vont être partagées, allouées et exploitées. Le but principal d'un système de logistique urbaine hyperconnectée est d'optimiser les coûts, les impacts, les services, les opérations, le partage des ressources et des tâches, etc., afin de satisfaire les objectifs économiques, sociaux et environnementaux de toutes les parties prenantes impliquées (ville, transporteurs, gouvernement, citoyens, etc.). Dans le système logistique proposé, on considère une coopération/mutualisation entre les transporteurs et les logisticiens qui vont partager leurs ressources (logistiques, humaines, matérielles, informationnelles, etc.) et leurs capacités de transport et d'entreposage. Ces acteurs vont former une mutuelle dont le but est de minimiser les coûts économiques (opérations, transport, gestion, etc.) et l'impact environnemental qui sont liés au transport urbain de marchandises. Les coûts d'impact écologique seront pris en compte surtout dans le cas où on a plusieurs types de flottes qui n'ont pas les mêmes niveaux d'émissions. Dans ce cas, le coût environnemental va influencer le choix des flottes qui vont opérer.

On considère une mutualisation telles que les actions et les ressources des différents acteurs associés sont gérées, coordonnées, exploitées et synchronisées par un gestionnaire indépendant qui va représenter l'association. Cette forme de gestion peut résoudre les problèmes de conflit d'intérêts et le désaccord pouvant survenir si les acteurs, eux-mêmes, gèrent la mutuelle (surtout dans les situations où les intérêts de quelques partenaires peuvent être en conflit avec ceux des autres). L'objectif principal de l'entité de gestion est d'optimiser l'utilisation des ressources partagées. Le rôle du gestionnaire est de déterminer le plan optimal de distribution de marchandises (qui augmente le profit de la mutuelle) en termes des ressources et de flux des offres et des demandes. Afin de satisfaire une demande et l'acheminer, on peut avoir recours aux ressources et services de plusieurs transporteurs collaborateurs. Donc, l'entité de gestion se charge du contrôle du système logistique et de la coordination entre les acteurs afin de garantir le bon fonctionnement des activités logistiques, la non-violation des réglementations

et le respect des exigences du client.

Dans notre travail, les partenaires partagent les coûts, les risques, les ressources, etc. Pour cela, il est nécessaire de réglementer les différentes répartitions des ressources. Pour cela, on définit les règles de partage comme suit : les partenaires mettent en commun toutes, ou une partie (selon leur stratégie), de leurs ressources matérielles telles que les flottes de véhicules et les entrepôts de stockage, de leurs ressources humaines (par exemple, chauffeurs) et de leurs ressources informationnelles. Le partage concerne la capacité de transport, les services et le stockage en tenant compte des différentes limites telles que le nombre de kilomètres maximal à faire (à plein ou à vide), l'espace ou le volume maximal des véhicules et des entrepôts, le taux d'utilisation des différentes ressources. En outre, on suppose que la contribution des différents acteurs en termes de ressources ne se fait pas d'une façon égale. Par conséquent, la distribution des coûts et du profit devient proportionnelle à l'apport de chaque partenaire. Les règles de partage seront présentées dans nos modèles d'optimisation sous forme de contraintes. Cependant, pour réussir la mutualisation, il faut mettre en place des règles de partage permettant de satisfaire les objectifs des différents acteurs et assurer leurs droits (matériels, économiques, etc.). Le tableau 3.1 résume les exigences de la logistique collaborative dans un réseau de la logistique urbaine hyperconnectée et mutualisée.

Tableau 3.1 Les exigences de la logistique collaborative dans un réseau de la logistique urbaine hyperconnectée et mutualisée

<b>Acteurs</b>	<p>Ville, autorités publiques, municipalités, etc.</p> <p>Entités gérantes, transporteurs, gestionnaires de terminaux, etc.</p> <p>Expéditeurs, clients finaux, etc.</p>
<b>Type du réseau</b>	Réseau hyperconnecté mutualisé à $n$ niveaux .
<b>Objectifs</b>	<p>Réduction de la dimension et du nombre de véhicules utilitaires en fonctionnement dans le contexte urbain.</p> <p>Réduction du nombre de véhicules-kilomètres vides.</p> <p>Amélioration de l'efficacité des mouvements de fret.</p> <p>Réduction des inefficacités économiques, sociales et environnementales des systèmes logistiques et de transport actuels.</p>
<b>Partage</b>	<p>Flottes de véhicules.</p> <p>Consolidation des charges.</p> <p>Informations.</p> <p>Ressources matérielles et humaines.</p> <p>Installations logistiques partagées (par exemple, centres de distribution municipaux).</p>

### **3.6 Conclusion**

On a présenté une description et un cadre général pour un système de logistique urbaine hyperconnectée. Ceux-ci permettront de mieux situer le contexte et la portée des travaux réalisés dans la suite de ce mémoire. Dans le chapitre suivant, on présentera le cadre de la modélisation et la planification tactique du système HCL proposé.



## CHAPITRE 4 : MODÉLISATION

### 4.1 Introduction

Le travail présenté dans cette partie porte sur la mise en œuvre d'un modèle de planification tactique d'un réseau HCL mutualisé et multimodal. On introduit d'abord, les différents aspects de notre modèle de planification, les ressources utilisées et les différents acteurs. Ensuite, on présente la notation utilisée et la formulation mathématique.

### 4.2 Énoncé du problème

Dans cette section, on va présenter le cadre de la modélisation du problème de transport dans un réseau HCL. Précisément, il s'agit d'un problème de planification de réseau hyperconnecté et mutualisé de transport de marchandises en ville. Dans un tel réseau logistique, la mise en commun des ressources et des capacités nécessite l'intervention de plusieurs acteurs et différents modes de transport dans le but d'assurer la satisfaction des demandes. Afin de mettre en place ces différents aspects, on traite ce problème en tant qu'un problème de conception de réseaux de services.

Dans notre problème, le modèle de conception de réseau est basé sur un réseau physique composé de différentes plateformes logistiques (centres de distribution urbains et satellites), de lieux de livraison et des liaisons entre ces différents éléments. On considère une mutualisation de transporteurs et logisticiens mettant en commun leurs ressources et capacités résiduelles de transport. Ces acteurs mutualisent à la fois leurs ressources et leurs informations dans le but d'optimiser les coûts économiques et l'impact environnemental. Les actions des acteurs collaborateurs sont synchronisées et coordonnées par un gestionnaire (l'entité gérante) représentant la coalition. Les offres logistiques considérées sont des prestations de transport.

Le système étudié est caractérisé par la présence des coalitions de transporteurs ayant différents types et quantités de ressources mises en commun. Par conséquent, il est difficile de faire une allocation équitable (entre tous les transporteurs collaborateurs) des coûts et des profits des services et des opérations effectuées par la coalition. De là vient la nécessité de trouver un moyen quantitatif afin de répartir le profit et/ou le coût total entre les différents participants. Pour cela, on a opté pour réglementer les différentes répartitions des ressources et définir les règles de partage comme suit : les partenaires mettent en commun, toutes ou une partie (selon leur stratégie), de leurs ressources matérielles telles que les flottes de véhicules, de leurs ressources humaines (par exemple, conducteurs) et de leurs ressources information-

nelles. Le partage concerne la capacité de transport et les services en tenant compte des différentes limites : le nombre de kilomètres maximal à faire (à plein ou à vide), l'espace ou le volume maximal des véhicules et des entrepôts, le taux d'utilisation des différentes ressources, etc. Par ailleurs, on suppose que la contribution des différents acteurs en termes de ressources n'est pas effectuée de façon égale. Par conséquent, la distribution des coûts devient proportionnelle à l'apport de chaque partenaire. Ces notions seront considérées dans la modélisation mathématique introduite par la suite.

Plus précisément, une offre de transport correspond à la mise à disposition/le partage d'un véhicule ayant une capacité définie et appartenant à un transporteur collaborateur sur une fenêtre de temps. Un véhicule peut servir à transporter plusieurs demandes simultanément. La planification proposée assure qu'un véhicule doit opérer sans violation des règles et des contraintes de partage liées aux coûts supportés et au temps de service maximal autorisé, afin de garantir le respect des parts des différents acteurs dans la coalition. Dans l'optique d'un transport intermodal et afin d'intégrer l'ensemble des ressources disponibles sur l'espace urbain considéré dans notre application, plusieurs modes de transport, ayant des caractéristiques bien différentes, sont intégrés (camions lourds ou légers et tram). L'aspect multimodal fait référence aux concepts fondamentaux de l'Internet Physique en général et de la HCL en particulier. L'intégration de plusieurs modes de transport dans notre modèle nous permet d'étudier l'impact de l'interconnexion sur la logistique urbaine.

L'objectif de notre étude est d'établir une planification de services du premier niveau qui serait, ensuite, opérée à plusieurs reprises sur un horizon temporel défini (par exemple, six mois). On optimise un calendrier cyclique pour les services de premier niveau de réseau HCL et la gestion des ressources, des différents transporteurs collaborateurs. Comme suggéré par [Crainic *et al.*, 2009], une façon de décomposer le problème est d'approximer le routage du deuxième niveau. Suite à l'incertitude de la demande et au niveau du détail très élevé dans le deuxième niveau, les clients auront un sous-ensemble prédéfini de satellites possibles, mais le routage à ce niveau ne sera pas considéré dans le processus de planification tactique. Par conséquent, on n'a pas un problème de conception de réseau de service pour la deuxième couche. Les fenêtres de temps vers le client sont transférées aux satellites par une approximation du temps de livraison. L'acheminement réel des demandes de deuxième niveau doit être résolu le jour précédant (the day-before) la réalisation des demandes réelles. Pour cela [Crainic *et al.*, 2009] ont donné un aperçu de la planification (the day-before). Par la suite, [Crainic *et al.*, 2015] ont inclus l'incertitude de la demande dans le modèle à deux niveaux et les stratégies d'ajustement du plan après la réalisation de la demande.

### 4.3 Les ressources

Dans la logistique urbaine, de nombreuses restrictions de capacité doivent être considérées. [Crainic *et al.*, 2009] ont défini plusieurs restrictions comme la capacité des véhicules ou des satellites que nous étendons maintenant. Dans le système proposé, afin d'assurer un transfert efficace des marchandises dans les satellites, les véhicules urbains et les city-freighters ne sont pas autorisés à attendre ou stationner dans les satellites. Chaque satellite est défini par un espace limité, qui peut être utilisé pour le transfert de marchandises. Cet espace restreint la taille du tramway ou le nombre de véhicules urbains sur un parking à un moment donné. Cependant, aucun espace n'est disponible pour stocker la marchandise dans les satellites. De plus, ils peuvent également avoir une limite de temps pendant laquelle le déchargement ou le chargement doit être effectué. C'est particulièrement le cas si les services de passagers sont combinés avec le transport de marchandises. Un tram de passagers ne devrait pas attendre plus longtemps dans une gare en raison d'activités de déchargement ou de chargement.

On considère que la coalition possède plusieurs flottes hétérogènes pour les véhicules urbains: non seulement différents modes de transport, mais, aussi des tailles différentes, par exemple, des camions ou des tramways. Afin de diminuer le niveau de complexité du problème, on considère que chaque transporteur collaborateur a une flotte homogène. Chaque type de véhicule urbain a une taille de flotte (à chaque zone externe) disponible sur l'ensemble de l'horizon de planification. Ils ont une capacité d'expédition prédéfinie et un dépôt de départ. Certaines ressources (taille de flotte, capacité du véhicule) sont disponibles sur l'ensemble de l'horizon de planification, tandis que l'espace, le temps, la disponibilité sur le réseau et les opérateurs peuvent varier au fil du jour et du temps. Par exemple, pendant les heures de pointe, un système de tram n'a pas, généralement, de capacité disponible pour effectuer des tâches du transport de marchandises supplémentaires.

### 4.4 Notations

Dans le modèle proposé, on optimise un calendrier cyclique pour les services de premier niveau de réseau HCL et la gestion des ressources des différents transporteurs collaborateurs. Le deuxième niveau est approximé. Le fait de respecter les exigences temporelles de chargement et/ou de livraison aux clients et synchroniser les opérations de transbordement nécessite l'introduction d'une dimension temporelle. Le plan résultant est construit pour l'ensemble de la durée du programme, qui est, selon le problème, une demi-journée ou même plus court. Ce plan est, ensuite, utilisé pendant plusieurs mois sachant qu'on assume que la capacité résiduelle et les services sont connus et sont fixés plusieurs mois d'avance, pour cela, la

planification proposée est de nature tactique. Seuls l'affectation des biens aux services et le deuxième niveau doivent être optimisés lorsque la demande réelle est réalisée. L'horizon de temps considéré est divisé en  $t = 1, \dots, T$ , chaque période représentant un petit intervalle de temps. Comme dans [Crainic *et al.*, 2009], la durée de la période est définie de telle sorte que (1) au plus un départ d'un service de sa zone externe peut être effectué pendant une période et (2) les paramètres liés au temps sont des multiples entiers de la durée de la période.

#### 4.4.1 La mutualisation

La particularité de notre problème de mutualisation dans un réseau de la logistique urbaine hyperconnectée est le partage de ressources et de capacités logistiques résiduelles. La résolution de ce problème fournit un plan de distribution détaillant les services, les tâches des véhicules et des infrastructures ainsi que le parcours des demandes admissibles. L'objectif est de déterminer la planification tactique de transport engendrant la minimisation des coûts logistiques de l'association. Plus généralement, il s'agit de montrer que la mise en commun des ressources et des capacités de différents transporteurs collaborateurs peut s'avérer une bonne solution pour la réduction des coûts des différents acteurs et la minimisation des nuisances reliées au transport urbain de marchandises.

On considère une coalition  $N$  formée par un ensemble de transporteurs de fret collaborateurs. Chaque transporteur  $n$  met à la disposition de la coalition une flotte de véhicules urbains et *city-freighters* afin d'assurer les services et satisfaire les demandes. Toutes les demandes peuvent être échangées et remplies par n'importe quel véhicule de la coalition. Chacune de ces ressources possède ses propres caractéristiques (type, vitesse de déplacement, capacité, fenêtre de temps d'utilisation, etc.). Soit  $\tau$  l'ensemble de tous les types de véhicules urbains et  $\tau_m$  l'ensemble des types de véhicules urbains pour le mode  $m$ . La capacité correspondante de chaque type de véhicule urbain est donnée par  $u_\tau$  et la taille de flotte dans chaque zone externe  $e$  est  $n_{e\tau}$ . Chaque véhicule urbain a une zone externe unique  $e \in \varepsilon$ , où il commence et finit ses opérations au début et à la fin de l'horizon de planification. La localisation des dépôts est pré-déterminée. On note qu'un type de véhicule peut être assigné à plusieurs zones externes, dans ce cas le type de véhicule est dupliqué.

Dans le cadre de notre problème, le but du gestionnaire est d'optimiser l'utilisation des ressources et des capacités. Plus précisément, à partir de l'ensemble d'offres et de l'ensemble de demandes, le gestionnaire détermine le plan de distribution (en matière de flux de marchandises et de véhicules/ressources utilisés) engendrant le plus faible coût de la coalition. Le gestionnaire se charge de la coordination des actions de l'ensemble des logisticiens afin de garantir le bon fonctionnement du système de transport, la satisfaction des demandes et le

respect de la qualité de services offerts. Cette coordination est une condition nécessaire au bon fonctionnement d'une approche mutualisée.

D'un point de vue décisionnel, le problème d'allocation de ressources sur ce réseau de transport hyperconnecté s'inscrit dans un cadre de planification tactique et de création d'un plan de transport à moyen terme. Le modèle qu'on propose vise à minimiser les coûts totaux d'opération du système  $C(N)$  pour la coalition  $N$ , tout en partageant les coûts entre les transporteurs collaborateurs. On assume que le poids  $\alpha_{n'}$  est un pourcentage affecté à chaque transporteur  $n' \in N$ . Le poids de chaque acteur collaborateur est préétabli lors de la création de la coalition. Il est fixé en fonction du degré (pourcentage) d'implication d'un transporteur au sein de la coalition par rapport aux autres acteurs (les ressources, la taille des flottes et la capacité mises en commun). Les coûts seront distribués selon cette pondération dans un intervalle  $[\alpha_{n'}^-; \alpha_{n'}^+]$  permettant de donner un maximum et un minimum d'allocation par transporteur à ne pas dépasser. On rappelle qu'on a introduit un seuil de tolérance de dépassement de  $+/- 5\%$  du poids de chaque transporteur. Cette distribution tient compte du poids de chaque joueur dans la coalition vis-à-vis du : (1) type, nombre et caractéristiques de sa flotte de véhicules et ses ressources, (2) poids de sa contribution dans la coalition. On note que l'utilisation des ressources des différents collaborateurs sera, également, limitée par le poids affecté à chaque acteur dans la coalition. Ces limitations sont introduites sous forme de contraintes dans le modèle mathématique. Le but de ces limitations est le fait d'assurer l'équité au sein de l'association et d'éviter la surexploitation de certaines ressources. Les contraintes de partage et d'utilisation des ressources considérées sont:

- Partager les coûts en fonction du pourcentage de participation  $\alpha_{n'}$  dans la coalition, en introduisant un seuil de tolérance de  $+/- 5\%$ . Les coûts supportés par chaque transporteur  $n'$  doivent être proportionnels à son poids au sein de la coalition et aux services et opérations effectués. On a utilisé des bornes supérieures  $\alpha_{n'}^+$ , des bornes inférieures  $\alpha_{n'}^-$  et des paramètres de partage  $\alpha_{n'}$  afin de mettre en place une certaine flexibilité considérée dans la réalité.
- Limiter l'utilisation des véhicules de chaque transporteur en termes de temps total de services effectués : l'utilisation de flotte de véhicules d'un transporteur  $n'$  doit être proportionnelle à son poids (sa participation) au sein de la coalition.
- Limiter l'utilisation des véhicules de chaque transporteur en termes des distances parcourues et de la capacité maximale transportée.

#### 4.4.2 Les plateformes

Dans notre travail, le terme plateforme fait référence à l'ensemble des établissements logistiques dédiés au cross-docking et/ou à l'entreposage. En milieu urbain, il s'agit des Centres de Distribution Urbain (CDU) et des satellites ( $\pi$ -hubs dans l'Internet Physique). Ces plateformes permettent l'optimisation de la circulation et l'acheminement des marchandises dans les aires urbaines par la mise en place de points de transfert de charge permettant leur consolidation. Elles permettent les opérations de transbordement et de stockage.

Plus précisément, l'ensemble des zones externes  $\varepsilon$  sont les installations (CDU) où les marchandises sont chargées dans les véhicules urbains (mis en commun par les transporteurs collaborateurs) et transportées vers l'ensemble des satellites  $Z$ . Cependant, les zones externes ne sont pas considérées comme des satellites dans notre modèle, donc les clients proches des zones externes ne sont pas considérés dans notre modèle. Les zones externes sont divisées en fonction des modes de transport  $M$  (camions et tramways),  $\varepsilon(\varepsilon^m)$  (par analogie pour les satellites  $Z^m$ ,  $m \in M$ ). Si différents modes de transport sont disponibles dans une zone externe  $e \in \varepsilon$ , alors,  $e$  fait partie de tous les sous-ensembles. Même principe pour les satellites.

On considère quatre types de capacités des satellites : chaque satellite a une capacité  $u_{zt}^\tau$  indiquant le nombre de véhicules urbains pour chaque période  $t$  que le satellite  $z$  peut accueillir. De plus, pour chaque satellite  $z$  la capacité des véhicules urbains de mode de transport  $m$  est limitée à  $u_{zt}^m$  à la période  $t$ . Le nombre de marchandises qui peuvent être déchargées ou chargées est, généralement, reflété par le nombre de *city-freighters* qui peuvent s'arrêter sur un satellite. On suppose que le volume total des marchandises assignées au satellite  $z$  dans la période  $t$  ne peut pas dépasser  $u_{zt}$ .

#### 4.4.3 Les offres de transport

Dans notre problème, une offre de transport correspond à la mise à disposition d'un véhicule urbain de type  $\tau$  ayant une capacité de transport  $u_\tau$  pendant un ensemble de périodes. Une offre de transport est caractérisée par une zone externe (CDU) unique  $e \in \varepsilon$ , où le véhicule commence et finit ses opérations au début et à la fin de l'horizon de planification après l'exécution de ses tournées planifiées. Dans le réseau HCL proposé, les ressources dédiées au transport urbain sont des véhicules utilisant les infrastructures routières (camions) et des trams.

#### 4.4.4 Les services

On considère un service comme étant un trajet à partir d'un sommet de départ jusqu'à un sommet d'arrivée à des horaires spécifiques. L'objectif est de sélectionner un ensemble de services  $R$  de véhicules urbains appartenant à une flotte du transporteur  $n$ . On assume que chaque transporteur possède une flotte et les flottes sont homogènes. Le service  $r$  commence à la zone externe  $e_r \in \varepsilon$ , visite plusieurs satellites et retourne à la même zone externe. L'ensemble ordonné de satellites visités est donné par  $\sigma^r$ . Si  $r$  visite le satellite  $i$  avant le satellite  $j$ , alors,  $i < j$ . Le temps de voyage entre deux points  $i$  et  $j$  dans le réseau HCL est défini par  $g_{ij}$ . Le temps de service pour charger et décharger un véhicule urbain  $\tau$  est  $h_\tau$ . Le temps de départ d'un service  $R$  de son origine  $e_r$  est  $t_0^r$ . Après, le véhicule urbain arrive dans une période  $t_1^r = t_0^r + g_{e_r z_1^r}$  au premier satellite  $z_1^r \in \sigma^r$ . Si on permet l'attente dans des satellites spécifiques, le temps d'attente d'un service  $r$  dans un satellite  $z$  est noté par  $w_{zr}$ . Après l'exécution des opérations de chargements et de déchargements et le temps d'attente possible, un véhicule urbain quitte le premier satellite à  $t_1^r + h_{\tau_r} + w_{z_1^r r}$ . Par conséquent, le plan général d'un service  $r$  est donné par un ensemble ordonné d'éléments  $t_i^r, i = 0, 1, \dots, |\sigma^r| + 1$ . La période de la visite d'un service à un satellite  $z_i^r \in \sigma^r$  est représentée par  $t_i^r = t_{i-1}^r + g_{z_{i-1}^r, z_i^r} + h_{\tau_r} + w_{z_i^r r}$ . À la fin des tournées, chaque service revient à une zone externe  $e_r$ , à une période  $t_{|\sigma^r|+1}^r$ .

#### 4.4.5 La modélisation de la demande

Le but du modèle est de satisfaire les demandes. Chaque demande  $d \in D$  est spécifiée par un volume  $v_d$ , une zone externe et la localisation du client final. Un coût fixe  $f_{de}$  est appliqué pour attribuer la demande  $d \in D$  à la zone externe  $e \in \varepsilon$ . Afin d'éviter des assignations exclusives, un ensemble de satellites potentiels  $Z(d) \subset Z$  est donné avec les coûts de distribution correspondants à  $s_{dzt}$  pour la demande  $d$  du satellite  $z$  à la période  $t$ . Outre que les coûts d'exploitation et de manutention, les coûts liés aux perturbations causées par les activités de fret pendant les opérations sont inclus.

De plus, chaque demande peut avoir une fenêtre de temps (1) quand elle sera disponible à l'origine  $[a_d^o, b_d^o]$  et (2) quand elle peut être livrée à la destination  $[a_d^d, b_d^d]$ . Si les produits sont, par exemple, disponibles à un certain moment dans une zone externe, mais n'ont pas encore de délai pour quitter le dépôt, ces limites sont fixées à  $T$  (ou à 0).

## 4.5 Modèle mathématique

Notre modèle est basé sur la formulation introduite par [Crainic *et al.*, 2009] qui définit explicitement tous les itinéraires possibles pour chaque demande. La figure 4.1 illustre un exemple d'itinéraire d'une demande (l'arc en bleu sur la figure). Le service sélectionné commence à partir du CDU et visite trois satellites avant de retourner au CDU de départ. Concernant la demande, la marchandise est chargée dans un véhicule urbain et transportée vers un deuxième satellite à partir duquel la demande est transmise au client final (l'arc bleu dans la figure 4.1). Dans ce cas, un itinéraire est la séquence de visites que le service effectue jusqu'au deuxième satellite et ensuite vers le client final. Dans la formulation proposée, tous les itinéraires, pour chaque demande, sont précalculés, ensuite, un seul itinéraire doit être sélectionné. En examinant cet itinéraire, on observe que toutes les informations requises peuvent être trouvées en sélectionnant le service et le satellite. La sélection d'un service implique la sélection du CDU et l'heure de départ. Pour cela, on n'a pas besoin d'une variable de décision explicite pour la sélection du CDU. De même, la sélection du satellite, qui se trouve sur l'itinéraire du service sélectionné, détermine à quel moment la demande est prête à être livrée et comment elle sera livrée au client en tenant compte de la synchronisation. Par conséquent, l'itinéraire de la demande est complètement défini en l'affectant à un service et à un satellite.

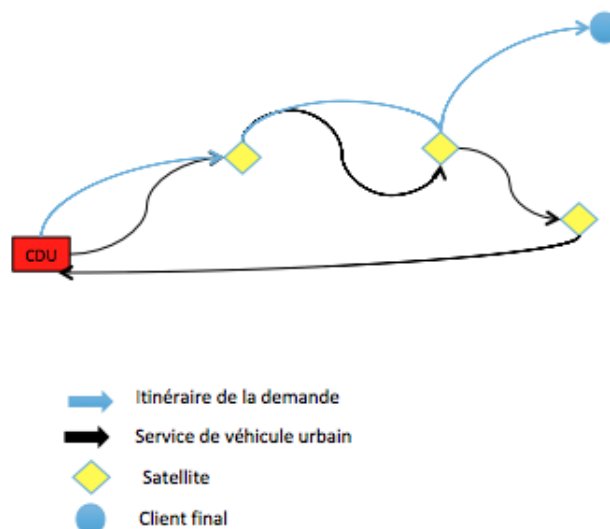


Figure 4.1 Illustration de l'itinéraire de la demande par rapport à la décision d'affectation



Pour notre formulation, on utilise la variable de décision binaire  $y_{rm}^n$  qui indique si le service  $r$ , utilisant le mode  $m$  est affecté au transporteur  $n$ . On a, également, la variable de décision  $x_{rdz}$  qui indique si la demande  $d$  est attribuée au service  $r$  et au satellite  $z$ .

Chaque service  $r \in R$  a un coût d'opération  $f_{rm}^n$ . Ce coût est supporté par un transporteur  $n$  s'il accepte un service  $r$ . On a également les coûts liés à l'affectation d'une demande à une zone externe  $F_{de}$  et à un satellite  $S_{dzt}$ .

### Résumé des notations:

- $M$  : Ensemble des modes de transport. Dans notre problème, on propose deux modes de transport: camions et trams.
- $N$  : Ensemble des transporteurs appartenant à la coalition.
- $C(N)$  : Le coût total de système (la coalition).
- $\alpha_{n'}$  : Le poids de chaque transporteur déjà préétabli lors de la mise en place de la coopération;  $\alpha_{n'} \in [\alpha_{n'}^-; \alpha_{n'}^+]$ .
- $t = 1, \dots, T$  : Horizon de planification.
- $\varepsilon(\varepsilon^m)$  : Ensemble des zones externes (de mode  $m$ ).
- $Z$  : Ensemble des satellites.
- $Z^m$  : Ensemble des satellites du mode  $m$ .
- $Z(d)$  : Ensemble des satellites potentiels pour une demande  $d$ .
- $\tau^m$  : Ensemble des types des véhicules urbains (de mode  $m$ ).
- $D$  : Ensemble des demandes.
- $R$  : Ensemble des services des véhicules urbains.
- $R(n)$  : Ensemble des services des véhicules-urbains effectués par un transporteur  $n$ .
- $R(t, \tau, e)$  : Ensemble des services de véhicules urbains  $\tau$ , pour une zone externe  $e$  dans une période  $t$ .
- $n_{e\tau}$  : Taille de flotte de véhicules urbains  $\tau$  dans une zone externe  $e$ .
- $u_{\tau_r}$  : Capacité de véhicule urbain  $\tau$  pour un service  $r$ .
- $u_{zt}^\tau$  : Capacité de satellite  $z$  en termes de nombre des véhicules urbains  $\tau$  dans une période  $t$ .
- $u_{zt}^m$  : Capacité de satellite  $z$  en termes de nombre des véhicules urbains  $\tau$  dans une période  $t$  pour un mode  $m$ .

- $u_{zt}$  : Limite de volume des chargements et des déchargements dans un satellite  $z$  dans une période  $t$ .
- $v_d$  : Volume de la demande  $d$ .
- $g_{ij}$  : Temps de voyage entre un point  $i$  et un point  $j$ .
- $w_{zr}$  : Temps d'attente d'un service  $r$  dans un satellite  $z$ .
- $e_r$  : Zones externes d'un service  $r$ .
- $\tau_r$  : Type de véhicule urbain d'un service  $r$ .
- $m_r$  : Mode de véhicule urbain d'un service  $r$ .
- $\sigma^r$  : Ensemble ordonné des satellites visités par un véhicule-urbain d'un service  $r$ .
- $t_0^r$  : Temps de départ d'un service  $r$  de véhicule urbain dans une zone externe.
- $t_i^r$  : Temps de départ d'un service  $r$  de véhicule urbain au  $i$ ème satellite.
- $h^n(r)$  : Temps de service  $r \in R$  effectué par un transporteur  $n$ .
- $h_\tau$  : Temps de service de véhicules urbain  $\tau$ .
- $F_{der}$  : Coûts d'affectation d'une demande  $d$  à la zone externe  $e$  pour un service  $r$ .
- $S_{dzt}$  : Coûts d'affectation d'une demande  $d$  à un satellite  $z$  pendant une période  $t$ .
- $f_{rm}^n$  : Coûts d'opération d'un service  $r$  effectué par le transporteur  $n$  avec un mode  $m$ .

Par la suite, on présente trois cas de modélisation qu'on va évaluer dans le chapitre 5 lors de l'expérimentation. On commence par l'introduction des variables de décision et de la fonction objectif communes entre les trois cas proposés. Ensuite, on exhibe les contraintes du **cas 0**, **cas 1** et, enfin, **cas 2**.

### Les variables de décision:

$$y_{rm}^n = \begin{cases} 1 & \text{si le service } r \subseteq R, \text{ utilisant le mode } m, \text{ est affecté au transporteur } n, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$x_{rdz} = \begin{cases} 1 & \text{si la demande } d \subseteq D \text{ est affectée au service } r \subseteq R \text{ et satellite } z \subseteq Z, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

En utilisant les notations introduites et les variables de décision définies, nous pouvons formuler le problème en proposant trois cas à étudier:

1. D'abord, le cas 0 concerne la formulation de base de notre problème;
2. Ensuite, on introduit le cas 1 en ajoutant les contraintes de partage des coûts entre les différents acteurs de la coalition. Ces contraintes permettent de faire une allocation des coûts entre les transporteurs collaborateurs. Les coûts supporté par chaque transporteur  $n'$  doivent être proportionnels à son poids au sein de la coalition et aux services et opérations effectués. On a utilisé des bornes supérieures  $\alpha_{n'}^+$ , des bornes inférieures  $\alpha_{n'}^-$  et des paramètres de partage  $\alpha_{n'}$  afin de mettre en place une certaine flexibilité considérée dans la réalité. On accepte un dépassement de  $+/- 5\%$ .
3. Enfin, on propose le cas 2 en ajoutant les contraintes permettant de limiter l'utilisation des ressources partagées en termes de temps total de services effectués. L'utilisation de flotte de véhicules d'un transporteur  $n'$  doit être proportionnelle à son poids (sa participation) au sein de la coalition.

### Fonction objectif:

$$C(N) = \text{Min} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R(n)} f_{rm}^n y_{rm}^n + \sum_{d \in D} \sum_{r \in R} \sum_{z \in Z} (S_{dzt} + F_{de_r}) x_{rdz} \quad (4.1)$$

### Sous contraintes :

$$\sum_{n \in N} y_{rm}^n \leq 1, \quad r \in R(n), \quad m \in M \quad (4.2)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{z \in Z} x_{rdz} = 1, \quad d \in D \quad (4.3)$$

$$\sum_{z \in Z} \sum_{d \in D} v_d x_{rdz} \leq u_{\tau_r} y_{rm}^n, \quad r \in R, \quad n \in N \quad m \in M \quad (4.4)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R(t, \tau, e)} y_{rm}^n \leq n_{e\tau}, \quad \tau \in \tau, \quad e \in \varepsilon, \quad t \in T \quad (4.5)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{t^- = t - h_\tau + 1}^t \sum_{r \in R(z, t^-)} y_{rm}^n \leq u_{zt}^\tau, \quad t \in T, \quad z \in Z \quad (4.6)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{t^- = t - h_\tau + 1}^t \sum_{r \in R(z, t^-, m)} y_{rm}^n \leq u_{zt}^m, \quad t \in T, \quad z \in Z, \quad m \in M \quad (4.7)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{r \in R} v_d x_{rdz} \leq u_{zt}, \quad t \in T, \quad z \in Z \quad (4.8)$$

$$y_{rm}^n \in \{0, 1\}, \quad r \in R, \quad n \in N, \quad m \in M \quad (4.9)$$

$$x_{rdz} \in \{0, 1\}, \quad r \in R, \quad d \in D, \quad z \in Z \quad (4.10)$$

La fonction objectif (4.1) minimise les coûts de sélection et d'exploitation d'un service, plus les coûts d'attribution d'une demande à un satellite, ainsi que les coûts d'attribution d'une demande à une zone externe. Les coûts d'affectation comprennent les coûts opérationnels de

ce terminal ainsi que les coûts de transport entre les satellites et les zones externes.

Les contraintes (4.2) assurent que chaque service ne peut être fait que par un seul transporteur. (4.3) garantit que chaque demande soit assigné exactement à un véhicule afin de ne pas permettre la division d'une demande. Les capacités de livraison des véhicules urbains sont assurées par (4.4). Les contraintes (4.5) garantissent que le nombre maximum de véhicules disponibles, d'un type donné, dans une zone externe, ne soit jamais dépassé. Les contraintes (4.6) et (4.7) limitent le nombre de véhicules urbains par satellite pendant chaque période, au total et par mode de transport. Les contraintes (4.8) limitent la quantité maximale de demandes qui peut être déchargée ou chargée sur un satellite à chaque période. Enfin, les contraintes (4.9) et (4.10) sont les contraintes de non-négativité.

Pour le **cas 1** étudié, on garde la formulation précédente de **cas 0** et on ajoute les contraintes (4.11) qui permettent l'allocation des coûts pour chaque transporteur appartenant à la coalition et qui limitent le dépassement des coûts de service toléré par chaque transporteur  $n'$  en fonction de son poids dans la coalition  $[\alpha_{n'}^-; \alpha_{n'}^+]$ .

$$\alpha_{n'}^- \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R(n)} f_r^n y_{rm}^n \leq \sum_{r \in R(n')} \sum_{m \in M} f_r^{n'} y_{rm}^{n'} \leq \alpha_{n'}^+ \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R(n)} f_r^n y_{rm}^n, \quad n' \in N \quad (4.11)$$

Pour le **cas 2** étudié, on garde la formulation précédente de **cas 1** et on ajoute les contraintes (4.12) afin de limiter l'utilisation des flottes des véhicules en termes de temps de service maximal permis en fonction des poids des transporteurs compris dans l'intervalle  $[\alpha_{n'}^-; \alpha_{n'}^+]$ .

$$\alpha_{n'}^- \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R(n)} h^n(r) y_{rm}^n \leq \sum_{r \in R(n')} \sum_{m \in M} h^{n'}(r) y_{rm}^{n'} \leq \alpha_{n'}^+ \sum_{n \in N} \sum_{r \in R(n)} h^n(r) y_{rm}^n, \quad n' \in N \quad (4.12)$$

Les trois cas proposés vont nous permettre de faire des comparaisons et des analyses liées à la structure des coalitions en appliquant les règles de partage. De plus, cela permet de voir la variation des résultats et des indicateurs de performance lors de l'expérimentation.

## 4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, d'abord, on a énoncé le problème. Ensuite, on a proposé un ensemble de notations et des modèles mathématiques de planification tactique pour le système HCL

mutualisé. La formulation mathématique présentée est une formulation en nombres entiers PLNE. On a mis l'accent sur les notions de partage au sein de la coalition et sur l'aspect multimodal du problème. Par la suite, dans le chapitre suivant on va présenter les différents cas et scénarios proposés, effectuer une série d'expériences numériques et analyser les résultats obtenus.

## CHAPITRE 5 : VALIDATION DU MODÈLE ET RÉSULTATS

### 5.1 Introduction

On a effectué une série d'expériences numériques afin d'évaluer, d'une part, la performance du modèle et de l'approche proposée et, d'autre part, l'impact de l'adaptation de l'approche mutualisée et de la multimodalité dans les modèles de planification tactique proposés dans le cadre d'un réseau de logistique urbaine hyperconnectée et mutualisée. On commence par la présentation de la configuration numérique. Ensuite, on présente les différents cas, scénarios et instances utilisés dans l'expérimentation. Enfin, on examine la performance des modèles et des solutions proposées et résolues par un solveur commercial.

### 5.2 Expérimentation

Le but de l'expérimentation est d'évaluer la structure du réseau et le modèle de planification tactique proposés, en termes de mesures de performance du système, des coûts du transport, du partage et de l'utilisation des flottes et des installations.

Toutes les expériences ont été menées sur un groupe de 27 machines ayant chacune deux processeurs Intel (R) Xeon (R) X5675 3,07 GHz avec 96 Go de RAM fonctionnant sous Linux. Chaque machine a 12 cœurs et chaque expérience a été exécutée en utilisant un seul fil. La formulation LP est implémentée en C++ à l'aide de CPLEX Concert Technology 12.8.0.0. CPLEX 12.8.0.0 est utilisé comme solveur.

Comme le but principal de notre travail est d'élaborer une planification tactique du réseau HCL et d'étudier l'impact de la mutualisation, on propose trois cas à expérimenter et évaluer: premièrement, utiliser le modèle mathématique de conception de réseau de services de base; deuxièmement, ajouter au cas de base les contraintes de partage des coûts entre les acteurs collaborateurs; troisièmement, ajouter au deuxième cas des contraintes (voir chapitre 4) permettant de limiter l'utilisation des flottes de véhicules partagées (par rapport aux poids des transporteurs) en matière de temps de voyage effectué par période de temps. Notons que dans notre modèle le temps de voyage est proportionnel à la distance parcourue. Le tableau 5.1 résume les cas étudiés.



Tableau 5.1 Les différents cas étudiés en fonction des contraintes de partage ajoutées

	Partage des coûts	Contraintes de limite de temps/distance
<b>Cas 0</b>		
<b>Cas 1</b>	✓	
<b>Cas 2</b>	✓	✓

Dans l'expérimentation, on utilise un ensemble d'instances basées sur quatre réseaux (voir Annexes: A, B, C et D). Ces réseaux s'inspirent d'une structure de ville typique présentée dans le travail de [Crainic et Sgalambro, 2014] et [Fontaine *et al.*, 2017]. On note que les données sont générées de façon aléatoire. Chaque réseau possède deux centres de distribution CDU. On a quatre réseaux N4, N6, N8-1 et N8-2 présentés dans le tableau 5.3 qui contiennent, respectivement, 4, 6, 8 et encore 8 satellites. On calcule les distances euclidiennes entre tous les points et les différentes vitesses de déplacement en fonction du véhicule utilisé. On considère un horizon de planification de 3 heures divisé en 36 périodes de 5 minutes chacune. La quantité maximale de demandes pouvant être chargée et déchargée sur un satellite à chaque période est 5000 unités. Chaque satellite peut opérer un camion ou un tram par période.

Afin d'étudier l'impact de l'approche mutualisée sur ce type de réseau, on a généré 4 instances de coalitions (Tableau 5.2);

1. La première coalition  $T_{Camion}$  contient un seul transporteur  $n_{Camion}$  ayant un camion de capacité 3000.
2. La deuxième coalition  $T_{Tram}$  contient un seul transporteur  $n_{Tram}$  ayant un tram de capacité 2100.
3. La troisième coalition  $T2$  contient 2 transporteurs collaborateurs, dont les poids sont distribués comme suit: 60% pour le transporteur  $n_1$  propriétaire du camion et 40% pour le transporteur  $n_2$  proposant les services de tram. Les poids sont attribués en fonction de la capacité qu'un transporteur collaborateur offre (mise en commun) et de degré d'implication au sein de la coalition.
4. La quatrième coalition  $T3$  contient 3 transporteurs collaborateurs, dont les poids sont distribués comme suit: 40% ( $n_1$ : Camion1), 35% ( $n_2$ : Tram) et 25% ( $n_3$ : Camion2).

Tableau 5.2 Les différents types de coalitions étudiées

$T_{Camion}$	$T_{Tram}$	T2	T3
$n_{Camion} : 100\%$ (Camion/ Capacité 3000)	$n_{Tram} : 100\%$ (Tram/ Capacité 2100)	$n_1 : 60\%$ (Camion/Capacité 3000) $n_2 : 40\%$ (Tram/Capacité 2100)	$n_1 : 40\%$ (Camion/Capacité 3000) $n_2 : 35\%$ (Tram/Capacité 2100) $n_3 : 25\%$ (Camion/Capacité 2000)

On rappelle que le poids (taux de partage) de chaque acteur collaborateur est préétabli par l'entité gérante lors de la création de la mutuelle, ce qui permet de distribuer les coûts, les services et l'utilisation des ressources afin d'assurer un partage équitable. On a introduit, aussi, un seuil de tolérance de dépassement de  $+/- 5\%$  du poids de chaque transporteur.

Dans le cadre de la multimodalité de notre système, on utilise des services de tram sur des lignes prédéfinies et des services de camions. Pour les réseaux N4, N6 et N8-1 (voir annexe) présentés dans le tableau 5.3, on utilise deux lignes de tram, une ligne pour chaque CDU et pour le réseau N8-2 on a une seule ligne. Le tram dispose d'une capacité de 2100. Il visite un ensemble de satellites puis revient sur le même trajet dans la direction opposée. Le tram opère plusieurs fois pendant chaque période, chaque départ définissant un service. On fait l'hypothèse que le tram circule sur une infrastructure dédiée et ne doit pas faire face à la congestion. Par conséquent, il s'agit d'un mode de transport plus rapide que le camion. Pour les services de camionnage, un sous-ensemble ordonné de satellites et un centre de distribution urbain sont sélectionnés pour chacun, tandis que la période de démarrage du service est générée au hasard.

Pour chaque réseau, on considère 4 scénarios avec, respectivement, 70, 80, 90 et 100 services. Pour le premier scénario, on utilise un grand camion ayant une capacité de 3000. Pour les autres scénarios, le nombre de services ayant augmenté, on ajoute un camion urbain plus petit ayant une capacité de 2000. Les différents réseaux sont présentés dans le tableau récapitulatif 5.3.

Tableau 5.3 Tableau récapitulatif des différentes instances des tests (réseaux et scénarios)

Les réseaux	Réseau N4	Réseau N6	Réseau N8-1	Réseau N8-2
<b>Scénario 1</b>	Services: 70	Services: 70	Services: 70	Services: 70
	Transporteurs: 2	Transporteurs: 2	Transporteurs: 2	Transporteurs: 2
	Véhicules: 2	Véhicules: 2	Véhicules: 2	Véhicules: 2
<b>Scénario 2</b>	Services: 80	Services: 80	Services: 80	Services: 80
	Transporteurs: 3	Transporteurs: 3	Transporteurs: 3	Transporteurs: 3
	Véhicules: 3	Véhicules: 3	Véhicules: 3	Véhicules: 3
<b>Scénario 3</b>	Services: 90	Services: 90	Services: 90	Services: 90
	Transporteurs: 3	Transporteurs: 3	Transporteurs: 3	Transporteurs: 3
	Véhicules: 3	Véhicules: 3	Véhicules: 3	Véhicules: 3
<b>Scénario 4</b>	Services: 100	Services: 100	Services: 100	Services: 100
	Transporteurs: 3	Transporteurs: 3	Transporteurs: 3	Transporteurs: 3
	Véhicules: 3	Véhicules: 3	Véhicules: 3	Véhicules: 3

Enfin, un coût de sélection fixe, ainsi qu'un coût total d'opération en fonction de la distance ont été calculés et affectés à chaque service effectué par chaque transporteur. On a utilisé 4 scénarios de demandes: 150, 160, 170 et 180 demandes. Les zones de demande sont réparties au hasard dans le centre de la ville. Chaque demande a des coûts d'affectation pour chaque centre de distribution urbain. Les fenêtres de temps et un volume (entre 50 et 100) sont générés aléatoirement. On considère, aussi, des fenêtres de temps (générées) de livraison au niveau des satellites. Les coûts client-satellite sont définis en fonction de la distance entre les sites concernés. Les différents paramètres des instances sont présentés dans le tableau récapitulatif 5.4.

### 5.3 Résultats et analyses

Dans cette section, on compare les résultats et les performances des différents cas et scénarios étudiés avec la formulation PLNE résolue par CPLEX. Ensuite, on analyse l'impact des différentes caractéristiques des instances sur les résultats obtenus. Une limite de 24 heures a été imposée au temps d'exécution pour toutes les instances. Les tableaux suivants indiquent les temps d'exécution moyens en secondes (CPU), ainsi que, les écarts et les objectifs des cas et des scénarios étudiés.

Cette section présente aussi, une analyse de sensibilité et l'influence de certains paramètres à savoir la variation de volume des demandes satisfaites, la variation de nombre de services

Tableau 5.4 Les paramètres des instances

<b>Nombre de demandes</b>	<b>150 / 160 / 170 / 180</b>
<b>Volume</b>	[50..100]
<b>Nombre de zones externes</b>	2
<b>Nombre de satellites</b>	4/6/8
<b>Horizon de planification</b>	36 (3h/36 périodes de 5 min)
<b>Nombre de modes</b>	2 (camions et tram)
<b>Nombre de véhicules</b>	3

proposés, le type des coalitions impliquées et la capacité offerte sur le temps de résolution, la performance du système et la variation des coûts.

### 5.3.1 Les impacts de la variation des demandes

Pour chaque scénario de demande, les tableaux 5.5 et 5.6 montrent le temps d'exécution moyen pour 32 instances à savoir les coalitions T2 (2 transporteurs) et T3 (3 transporteurs), les 4 réseaux (N4, N6, N8-1 et N8-2) et les 4 scénarios de services (70, 80, 90 et 100). Parmi ces instances, CPLEX n'a pu en résoudre à l'optimalité que quelques-unes en 24 heures de calcul. Par contre, les écarts présentés dans les tableaux 5.7, 5.8, 5.9 et 5.10, sont minimes. L'écart d'optimalité pour les instances non résolues est compris entre 0,0099% et 0,002%.

Tableau 5.5 Temps d'exécution selon le nombre des clients pour S1

	<b>Cas 0/T2</b>	<b>Cas 1/T2</b>	<b>Cas 2/T2</b>
<b>Demandes</b>	<b>Sec CPU</b>	<b>Sec CPU</b>	<b>Sec CPU</b>
<b>150</b>	48.17	914.24	1291.91
<b>160</b>	32.74	1340.87	1398.43
<b>170</b>	110.47	2002.68	2399.92
<b>180</b>	170.38	2565.81	9693.91

En analysant les résultats présentés dans les tableaux 5.5 et 5.6, on remarque que le temps d'exécution augmente considérablement en ajoutant des contraintes qui limitent l'utilisation

Tableau 5.6 Temps d'exécution total pour S2, S3 et S4 selon le nombre des clients

	Cas 0/T3	Cas 1/T3	Cas 2/T3
Demandes	Sec CPU	Sec CPU	Sec CPU
150	309.06	8669.03	9289.36
160	322.85	2183.84	22875.48
170	485.63	3082.73	8518.44
180	644.9	14234.97	82467.27

des flottes de véhicules dépendamment, des poids des transporteurs impliqués dans le scénario étudié. Plus précisément, en augmentant le nombre de demandes de 150 jusqu'à 180, le temps d'exécution augmente de 100% en moyenne. La croissance du temps d'exécution (CPU), entre les cas 0, cas 1 et le cas 2 est considérable, surtout quand on fait varier le nombre de transporteurs impliqués. Ces résultats prouvent l'augmentation de la complexité de résolution du problème quand on ajoute les contraintes qui limitent l'utilisation des ressources partagées.

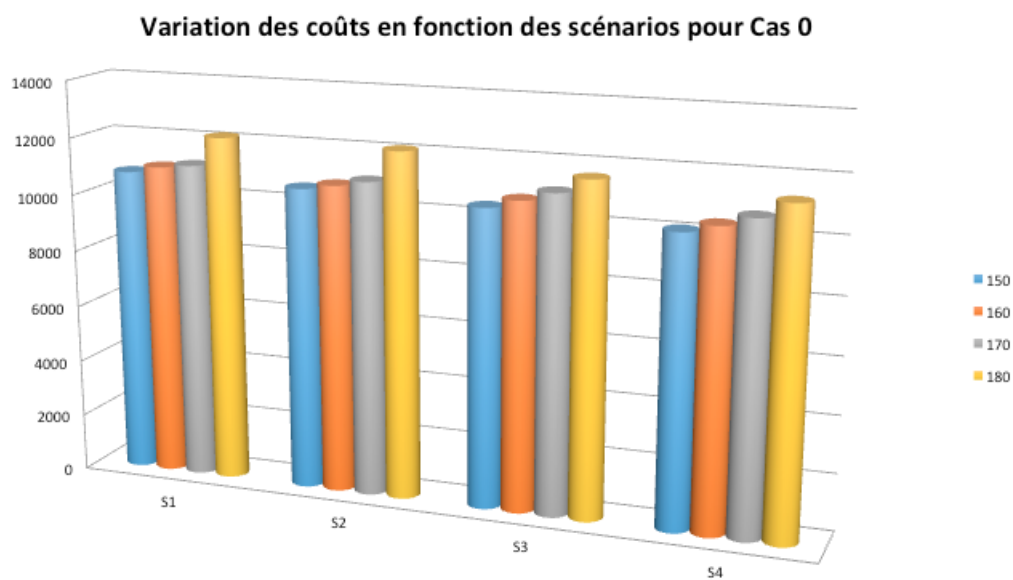


Figure 5.1 Variation des coûts pour cas 0

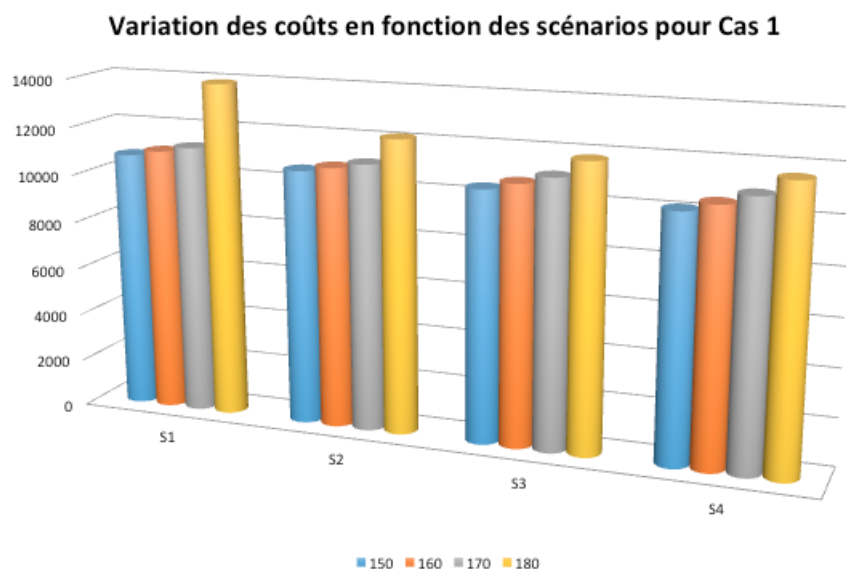


Figure 5.2 Variation des coûts pour cas 1

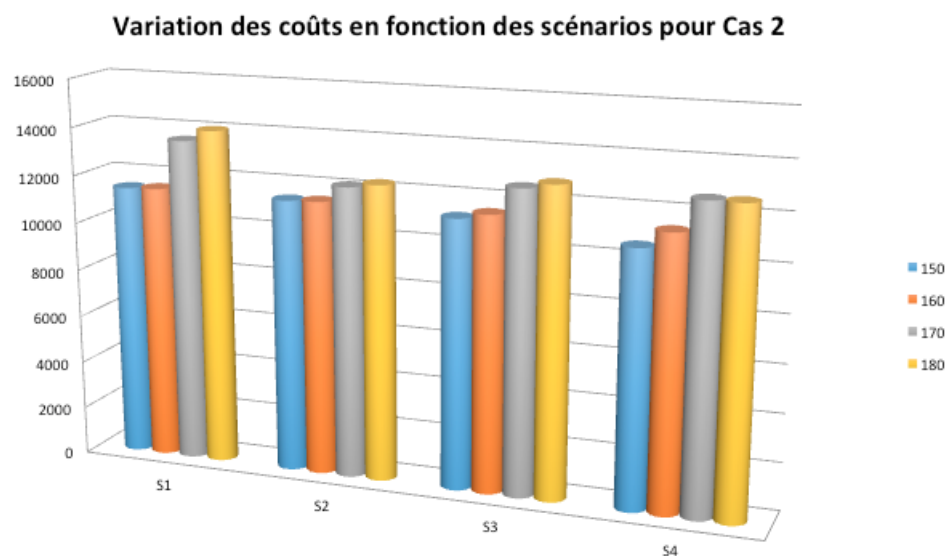


Figure 5.3 Variation des coûts pour cas 2

Les figures 5.1, 5.2 et 5.3 montrent les variations des coûts des coalitions pour les différents scénarios (S1 (T2), S2, S3 et S4 (T3)) et les différents cas étudiés. En analysant les figures, on remarque que les coûts supportés par les coalitions varient selon les paramètres suivant:

- Lors de l'augmentation du volume des demandes, les coûts augmentent suite à la hausse du nombre de services et, par conséquent, on observe une augmentation des coûts de services;
- Concernant les différents cas étudiés, les coûts totaux diminuent lorsque le nombre de services proposés augmente. À cet égard, les coûts pour le scénario S4 (100 services) sont, souvent, plus faibles que ceux pour les autres scénarios (70, 80 et 90 services), surtout quand l'offre de capacité est élevée (coalition T3) et le volume des demandes à satisfaire est faible (par exemple, le cas de 150 demandes);
- Les coûts sont plus élevés pour le scénario S1 de la coalition T2 puisqu'elle contient seulement 2 transporteurs collaborateurs avec une capacité offerte égale à 5100. Par contre, pour les autres scénarios un nouveau transporteur rejoint la coalition avec un camion ayant une capacité de 2000 pour former T3. Subséquemment, la capacité offerte par la coalition augmente pour atteindre 7100 et, par conséquent, les coûts totaux de la coalition T3 sont inférieurs à ceux de T2, surtout lorsque le volume de la demande est élevé (par exemple, 180);
- L'ajout des contraintes de partage des coûts (cas 1) et des contraintes de limitation d'utilisation des ressources (cas 2) entraîne une légère augmentation des coûts. Ces contraintes limitent l'utilisation de certaines ressources moins coûteuses comme le tram, pour lequel, les coûts environnementaux sont plus faibles. Cependant, ces contraintes permettent de respecter les règles exigées lors de la formation de la mutuelle, d'assurer une équité au sein de la coalition et d'éviter une surexploitation de certaines ressources.

### 5.3.2 Les impacts de la variation des services

Tableau 5.7 Impact de la variation de la demande avec 70 services (S1)

	Cas 0		Cas 1		Cas 2	
Demands	$C(N)$	% Écarts	$C(N)$	% Écarts	$C(N)$	% Écarts
<b>150</b>	10764.12	0	10768.19	0	11421.12	< 0.01
<b>160</b>	11002.43	0	11008.71	0	11468.17	< 0.01
<b>170</b>	11130.32	0	11244.91	0	13547.66	< 0.01
<b>180</b>	12170.82	0	13938.36	0	14030.27	< 0.01

Tableau 5.8 Impact de la variation de la demande avec 80 services (S2)

S2	Cas 0		Cas 1		Cas 2	
Demandes	$C(N)$	% Écarts	$C(N)$	% Écarts	$C(N)$	% Écarts
<b>150</b>	10612.10	0	10627.20	< 0.01	11402.91	0
<b>160</b>	10801.61	0	10844.81	< 0.01	11445.22	< 0.01
<b>170</b>	11008.12	0	11072.05	0	12132.41	0
<b>180</b>	12119.24	< 0.01	12170.82	0	12304.61	< 0.01

Tableau 5.9 Impact de la variation de la demande avec 90 services (S3)

S3	Cas 0		Cas 1		Cas 2	
Demandes	$C(N)$	% Écarts	$C(N)$	% Écarts	$C(N)$	% Écarts
<b>150</b>	10433.44	< 0.01	10438.43	0	11211.71	< 0.01
<b>160</b>	10754.10	< 0.01	10755.13	0	11462.29	0
<b>170</b>	11086.30	< 0.01	11097.22	0	12586.44	< 0.01
<b>180</b>	11614.90	< 0.01	11824.13	0	12828.22	< 0.01

Tableau 5.10 Impact de la variation de la demande avec 100 services (S4)

S4	Cas 0		Cas 1		Cas 2	
Demandes	$C(N)$	% Écarts	$C(N)$	% Écarts	$C(N)$	% Écarts
<b>150</b>	10123.31	< 0.01	10172.53	0	10627.20	< 0.01
<b>160</b>	10413.15	< 0.01	10529.17	< 0.01	11326.47	< 0.01
<b>170</b>	10752.12	< 0.01	10949.32	0	12637.31	0
<b>180</b>	11310.52	0	11640.19	0	12636.13	0

Ensuite, on analysera l'effet de l'augmentation du nombre de services sur la résolution. Pour cela, on considère 4 scénarios de demande 150, 160, 170 et 180 et le réseau N8-1 en se basant sur le premier scénario S1 comme scénario de référence. Pour le scénario S1, on



utilise seulement deux véhicules, un camion (capacité 3000) et un tram. Donc, seulement la coalition T2 avec deux transporteurs est considérée. Ensuite, on ajoute 10, 20 et 30 services au scénario de référence S1 et on ajoute, aussi, un nouveau camion ayant une capacité de 2000 (et un nouveau transporteur  $n_3$ ). Dans les scénarios S2, S3 et S4, on considère une coalition qui comporte 3 transporteurs collaborateurs.

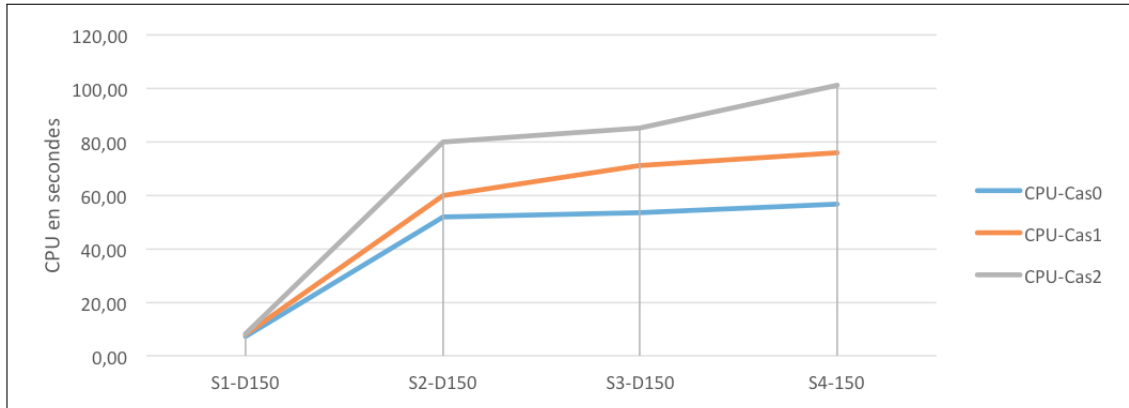


Figure 5.4 Variation de CPU en fonction des différents scénarios de services

Les résultats présentés dans les tableaux 5.7, 5.8, 5.9 et 5.10, montrent que CPLEX n'a pas pu résoudre toutes les instances à l'optimalité dans les 24 heures, mais les écarts sont très petits: entre 0,0022% et 0,009%, pour les instances non résolues à l'optimalité. Le nombre d'instances résolues à l'optimalité diminue lorsque le nombre de services augmente. De plus, d'après les résultats obtenus, on remarque que les coûts totaux, l'écart et le CPU augmentent dans cas 2, pour les scénarios S2, S3 et S4, puisqu'on a ajouté des contraintes qui limitent le temps de service effectué par chaque transporteur en fonction de sa participation au sein de la coalition. On remarque aussi que plus le nombre de demandes augmente, plus l'objectif et le temps d'exécution augmentent. Par contre, quand le nombre de services augmente, pour le même nombre de demandes, l'objectif et le CPU s'améliorent (voir tableaux 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 et figure 5.4). De plus, quand le nombre de demandes est relativement grand (par exemple, 180), la valeur de l'objectif s'améliore quand on augmente le nombre de services proposés, mais se détériore quand on ajoute les contraintes de partage. Cela vient du fait que les contraintes de partage bornent l'utilisation libre de certaines ressources malgré leurs coûts d'utilisation relativement faibles. On remarque aussi que l'objectif s'améliore lors de l'ajout d'un nouveau transporteur (coalition T3). Cela vient du fait que le nouveau membre de la coalition partage un nouveau véhicule, ajoute de la capacité et effectue des services.

### 5.3.3 Études de la mutualisation et la multimodalité du réseau

Maintenant, à l'aide du tableau 5.11 on étudiera les avantages de l'utilisation des différents modes de transport. Pour ces analyses, on considère les deux scénarios avec 150 clients, ainsi que le réseau N4 ayant quatre satellites avec le scénario S1 (70 services). Les expériences ont été menées en considérant les deux modes (camion et tram) ensemble ou un seul mode à la fois.

Dans le tableau 5.11, on a utilisé deux types de coalitions: la première coalition  $T_{Tram}$  comporte un seul transporteur propriétaire du tram; la deuxième  $T_{Camion}$  comporte un seul transporteur propriétaire du camion; pour le cas multimodal  $T2$ , la coalition est formée par deux transporteurs, chacun possédant un mode de transport différent. Le transporteur  $n_1$  partage son camion et  $n_2$  son tram.

Pour évaluer et comparer les différents paramètres, les indicateurs clés de performance suivants sont utilisés: le coût total de la solution finale, le temps d'exécution, les écarts et le nombre de services exploités en %.

Tableau 5.11 Analyse de la structure de la flotte

	Coalition	Objectif	Écarts en %	Sec CPU	Services de $n_1$	Services de $n_2$
<b>Camion+Tram</b>	T2	11132.63	0	27.32	49% (camion)	51% (tram)
<b>Camion</b>	$T_{Camion}$	12103.08	< 0.01	6.49	100%	-
<b>Tram</b>	$T_{Tram}$	11865.77	0	8.27	-	100%

Le tableau 5.11 compare la performance du système ayant une flotte multimodale avec les deux cas unimodaux. On observe que la structure de la flotte multimodale réduit considérablement les coûts. Par contre, le temps d'exécution a tendance d'être plus élevé dans le cas multimodal. Cela s'avère logique, puisque la complexité de résolution augmente en combinant plus qu'un mode de transport. On observe que la structure de la flotte multimodale se base plus sur l'utilisation du tram pour établir les services à savoir 49% des services sont effectués par le camion et 51% sont assurés par le tram. Le tram s'avère plus performant en fonction des coûts et de nombre de services effectués puisqu'il circule sur une infrastructure dédiée et ne fait pas face à la congestion. Les gains en coûts totaux pour l'utilisation de tram sont dus à sa rapidité, à sa performance et à l'absence de pollution atmosphérique lors de son usage. Avec son moteur électrique, le tram consiste en un mode de transport à, presque, zéro pollution, contrairement à un camion à moteur diesel ayant un taux d'émissions élevé. Par conséquent, il s'agit d'un mode de transport plus efficace, économe et écologique. De ce

fait, la réduction des coûts totaux en combinant les deux modes de transport, montre que le modèle tire avantage de la mutualisation et des points forts des deux modes.

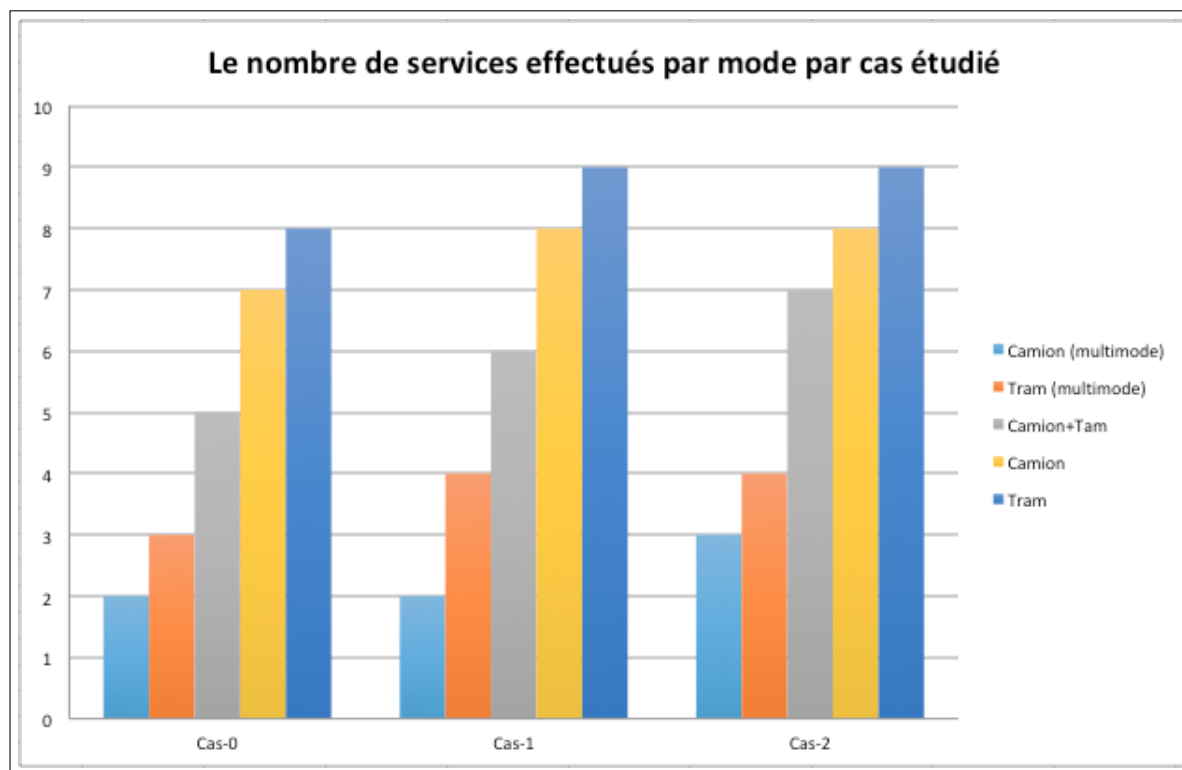


Figure 5.5 Nombre de services effectués

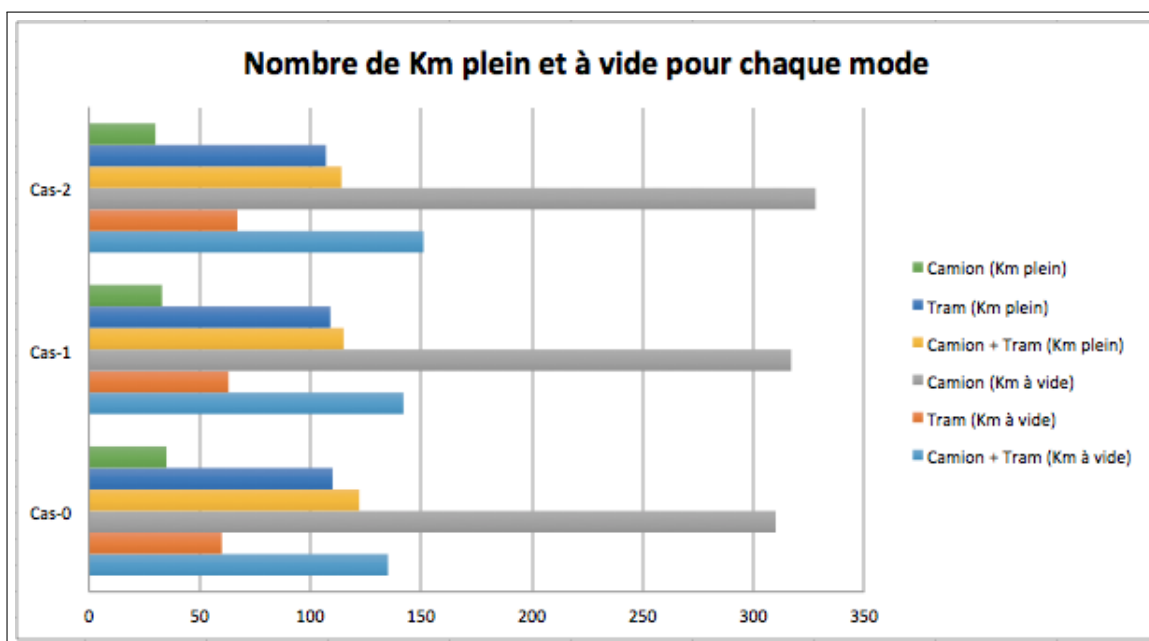


Figure 5.6 Kilométrage à plein et à vide par mode de transport

Le tableau 5.11 et les figures 5.6 et 5.5 comparent la flotte mixte (multimodale) de la coalition T2 aux deux coalitions  $T_{Camion}$  (camion) et  $T_{Tram}$  (tram), ayant des structures de flottes unimodales. La comparaison est, principalement, en termes de nombre de services effectués, de taux d'utilisation de véhicules dans la zone de départ CDU, ainsi que du nombre de kilomètres à plein et à vide. Le nombre de km à vide est défini comme étant le nombre total de kilomètres parcourus sans marchandise et le nombre de km à plein est défini comme étant le nombre total de kilomètres parcourus avec un véhicule complet en supposant qu'un camion ou un tram est plein lorsque plus de 80% de sa capacité est utilisée dans un segment. Pour le cas de la flotte multimodale, les résultats sont divisés en tram et camion entre parenthèses. D'après les résultats, on remarque que la structure de la flotte multimodale de T2 réduit considérablement les coûts et le nombre de services exploités et optimise l'utilisation des véhicules. Cela est vrai pour tous les cas où les services de ligne de tram font partie du système HCL.

Concernant la mutualisation, on remarque que la collaboration de deux transporteurs ayant deux modes de transport différents (tram et camion) permet de réduire considérablement le nombre de km à vide et le nombre de services, suite à l'augmentation de la capacité résiduelle, à la consolidation des demandes et à l'optimisation de l'utilisation des flottes. Cependant, en ajoutant les contraintes de limitation d'utilisation des ressources et de partage des coûts, on remarque une légère augmentation de nombre de services et de nombre de km à vide

effectués. Cette augmentation est justifiée par le respect des règles de partage et l'utilisation équitable des ressources au sein de la coalition.

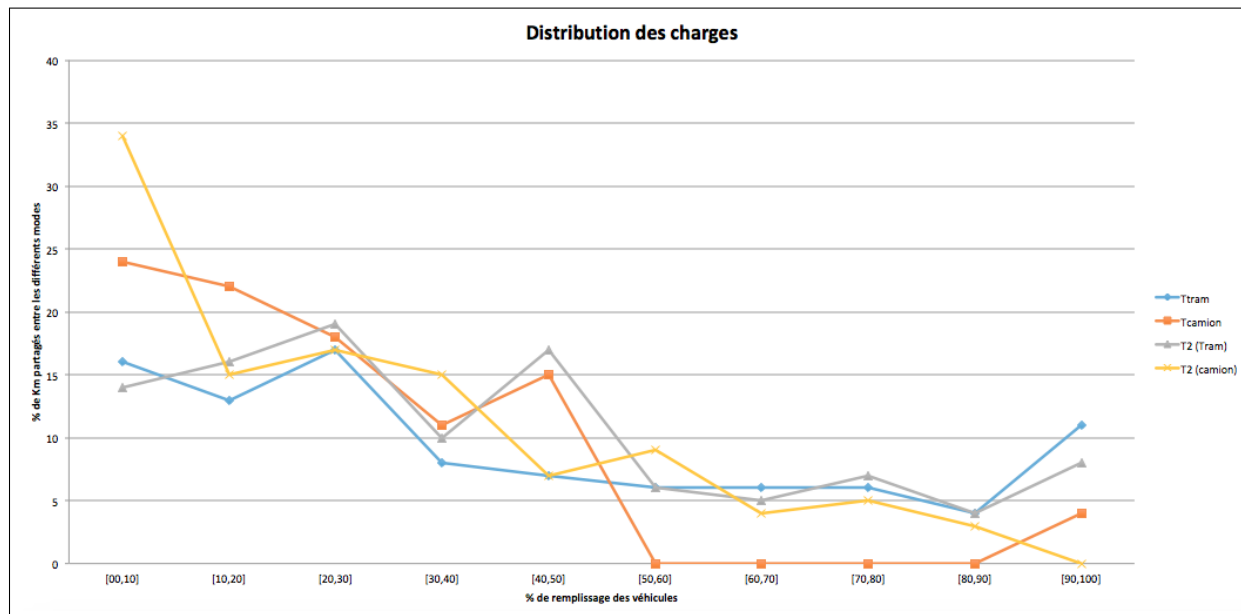


Figure 5.7 Distribution des charges

Dans la figure 5.7, on analyse plus en détail le chargement des véhicules. Les niveaux de chargement sont regroupés en 10 catégories de chargement, et la figure affiche, pour chaque catégorie, le pourcentage du nombre total de kilomètres parcourus. Par exemple, la catégorie [50-60] montre la part de ce transporteur en termes de la distance totale parcourue (en km) lorsque de 50% à 60% de la capacité du véhicule est utilisée. Les niveaux de chargement sont affichés pour chaque type de coalition  $T2$  (camion + tram),  $T_{Camion}$  (camion) et  $T_{Tram}$  (tram).

La figure 5.7 indique que les véhicules sont souvent chargés à moins de 90% de leur capacité. Dans tous les cas proposés, pour la fraction du kilométrage total effectuée avec une charge de plus de 90% de la capacité, on remarque que le mode tram est le plus performant avec environ 10%, tandis que le camion effectue 4.1% dans le cas de la coalition  $T_{Camion}$  et 0% dans le cas multimodal  $T2$ . Dans notre étude, l'utilisation de plusieurs compartiments du tram accompagnée de l'utilisation des PI-conteneurs facilite le chargement et le déchargement de marchandise lors des tournées (satellites) et optimise l'utilisation de la capacité de tram. Cela explique son facteur de charge élevé. Dans le scénario de camion, aucun camion ne conduit avec une charge comprise entre 50% et 90%. Cela signifie que les camions sont chargés spécialement pour livrer aux satellites les plus proches de CDU de départ. Cela

cause un taux de remplissage plus faible que le tram. Le tram, de son côté, est utilisé pour effectuer des services plus longs à cause de sa rapidité, sa performance, sa capacité et de son infrastructure (lignes de tram) permettant d'éviter la congestion et de se rendre à des satellites plus loin. Par conséquent, le taux de remplissage de tram est, souvent, plus élevé. Néanmoins, l'utilisation de tram seulement, n'est pas préférable. Étant donné que les trams font des allers et des retours sur la ligne, parfois le temps de trajet est plus long que celui du camion, surtout quand ce dernier effectue des tournées courtes en utilisant des raccourcis et des routes non congestionnées. La réduction de nombre de services, l'augmentation du taux de remplissage et la diminution des voyages à vide pour la coalition *T2* combinant les deux modes de transport, montrent que le modèle bénéficie des forces des deux modes.

L'augmentation de facteur de charge des véhicules et du nombre de voyages à plein et la réduction du nombre de voyages à vide, du nombre de services effectués et de la longueur des tournées, permettent de diminuer le nombre de véhicules (de fret) dans les aires urbaines, de diminuer la congestion et de réduire les émissions et les impacts négatifs sur l'environnement et sur la société en général. En conséquence, on peut déduire que les résultats obtenus et les conclusions tirées coïncident avec les objectifs fondamentaux du système HCL mutualisé.

Pour conclure, le tableau 5.12 présente une synthèse des résultats et des conclusions obtenus et exhibe les différents avantages et inconvénients du système et de la planification proposés.

Tableau 5.12 Avantages et inconvénients du système proposé

	Avantages	Inconvénients
<b>Mutualisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Gains en fonction des coûts de services, des coûts environnementaux, des coûts des opérations, etc.</li> <li>. Optimisation de l'utilisation des ressources sans violation des limites exigées par les acteurs collaborateurs.</li> <li>. Satisfaction des demandes d'une façon efficace d'un point de vue économique et écologique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Légère augmentation des coûts totaux lors de l'application des contraintes liées au partage des coûts et à la limitation de l'utilisation des ressources.</li> </ul>
<b>Multimodalité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Gains en fonction des coûts de services, des coûts environnementaux, des coûts des opérations, etc.</li> <li>. Augmentation de facteur de charge des véhicules utilisés.</li> <li>. Diminution de nombre de services effectués pour la satisfaction de la demande.</li> <li>. Diminution de nombre de Km à vide et augmentation de nombre de Km à plein.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Dans la pratique, l'utilisation des Trams pour la livraison de marchandises nécessite la mise en place d'une infrastructure dédiée à ce type de transport.</li> <li>. Bien étudier les horaires et la capacité disponible pour la livraison de marchandise sans perturber la mobilité des voyageurs.</li> <li>. La multimodalité nécessite une bonne synchronisation et une entente entre les différents acteurs et modes utilisés.</li> </ul>
<b>Planification tactique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Plan répétitif sur une période de 6 mois ou plus.</li> <li>. Prévisions et connaissance des acteurs impliqués, des services proposés et des demandes prévues.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Ne tient pas compte des imprévus et de la stochasticité de la demande (et du système en général).</li> <li>. Ajouter une planification The-Day-Before permet de rectifier le plan et d'apporter les changements nécessaires.</li> </ul>

## 5.4 Conclusion

Après la modélisation mathématique, dans ce chapitre, on a proposé des cadres d'expérimentation numériques afin d'évaluer la performance du modèle et de l'approche proposés et l'impact de l'adaptation de l'approche mutualisée et de la multimodalité dans les modèles de planification tactique proposés dans le cadre d'un réseau de logistique urbaine hyperconnectée et mutualisée. Ensuite, on a réalisé des analyses des résultats obtenus en évaluant la complexité du problème, le temps d'exécution et les valeurs objectifs. On a comparé les mesures de performance de la solution proposée sur plusieurs cas et scénarios. On a conclu que l'approche mutualisée et la multimodalité donnent plus de flexibilité et de meilleurs résultats pour les réseaux HCL. Les solutions obtenues ont validé les modèles de planification et les hypothèses proposés.



## CHAPITRE 6 : CONCLUSION GÉNÉRALE

La logistique collaborative, la coopération, la consolidation et la mutualisation sont des concepts clés pour la logistique urbaine et l'Internet physique. Ces concepts sont complémentaires, puisque la logistique urbaine fournit les derniers segments des réseaux logistiques et de transport hyperconnectés compatibles avec Internet physique.

Dans ce travail, on a présenté et discuté quelques concepts fondamentaux de systèmes de la logistique urbaine hyperconnectée et mutualisée (HCL). C'est un système logistique basé sur la collaboration et la mutualisation entre des transporteurs de marchandises dans les aires urbaines. Ce système fait le lien entre deux paradigmes importants: la logistique urbaine et l'Internet physique. Ce système héberge de nouveaux concepts majeurs visant à changer la manière dont les systèmes de transport de marchandises et de logistique sont définis, conçus, planifiés, exploités et gérés. Cela aide à accroître l'efficacité et la durabilité économiques et environnementales.

Dans la littérature scientifique, jusqu'à maintenant, [Crainic et Montreuil, 2016] est le seul travail qui a présenté quelques concepts fondamentaux de la logistique urbaine hyperconnectée, mais aucune étude n'a déjà proposé des stratégies de planification ou de modélisation pour ce type de système complexe. Notre travail de recherche contribue à combler ces lacunes en proposant des modèles d'optimisation, afin de mettre en place une planification tactique du système proposé. Pour cela, on propose un modèle de conception de réseau de service permettant d'optimiser l'ensemble du système hyperconnecté qui prend en compte à la fois la mutualisation, le partage de ressources et les services multimodaux. Pour résoudre le problème, on a introduit une formulation du problème.

Après la modélisation mathématique, on a proposé un cadre d'expérimentation qui vise à résoudre notre problème à l'aide du solveur commercial CPLEX. Ensuite, on a réalisé des analyses des résultats obtenus en évaluant la complexité du problème, le temps d'exécution et les valeurs objectifs. On a comparé les mesures de performance de la solution proposée sur plusieurs cas et scénarios. Ceci nous a permis de montrer que l'approche mutualisée et la multimodalité donnent plus de flexibilité et de meilleurs résultats pour les réseaux HCL.

Pour le futur, on peut envisager deux directions de recherche stimulantes. La première consiste à proposer des méthodes de résolution pour le problème avec des instances et paramètres de taille beaucoup plus importante. Les méthodes de décomposition, comme celle de Benders et les métaheuristiques sont de bons choix à considérer. Une seconde avenue de recherche intéressante serait d'introduire des éléments d'incertitude dans les données des problèmes

traités.

D'un point de vue plus global, de nouveaux protocoles et des processus d'exploitation doivent être élaborés. Aussi, des règles et des algorithmes de planification, de déploiement, de tarification, etc., doivent être conçus dans un contexte stochastique tout en respectant les objectifs de logistique urbaine et de l'Internet Physique: moins de véhicules dans la ville et moins d'impacts sur l'environnement. Au niveau de la planification, des modèles et des méthodes doivent être, aussi, élaborés pour concevoir et évaluer les architectures de systèmes, les services et les politiques de la gestion opérationnelle.

## RÉFÉRENCES

Agrion, “La mutualisation des plates-formes logistiques”, *Compte-rendu de Conférence, jeudi 30 avril, Paris.*, 2009.

J.-F. Audy, N. Lehoux, S. D’Amours, et M. Rönnqvist, “A framework for an efficient implementation of logistics collaborations”, *International transactions in operational research*, vol. 19, no. 5, pp. 633–657, 2012.

E. Ballot, B. Montreuil, et R. Meller, “The physical internet”, *The network of logistics networks, la documentation Française*, 2014.

T. Bektas, T. G. Crainic, et T. Van Woensel, “From managing urban freight to smart city logistics networks”, 2015.

T. Bektaş, T. G. Crainic, et T. Van Woensel, “From managing urban freight to smart city logistics networks”, dans *Network Design and Optimization for Smart Cities*. World Scientific, 2017, pp. 143–188.

A. Benjelloun et T.G. Crainic, “Trends, challenges, and perspectives in city logistics”, dans *Transportation and Land Use Interaction, Proceedings TRANSLU’08*. Editura Politecnica Press, Bucharest, Romania, 2008, pp. 269–284.

Benjelloun, A., Bigras, Y., et Crainic, T.G., “Towards a taxonomy of city logistics systems”, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d’entreprise, la logistique et le transport, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada, Publication, 2008.

M. Browne, M. Sweet, A. Woodburn, et J. Allen, “Urban freight consolidation centres final report”, *Transport Studies Group, University of Westminster*, vol. 10, 2005.

T. Crainic et F. Semet, *Recherche opérationnelle et transport de marchandises*. Montréal: Centre de recherche sur les transports (CRT)= Centre for Research on Transportation, 2005.

T. G. Crainic, “Service network design in freight transportation”, *European Journal of Operational Research*, vol. 122, no. 2, pp. 272–288, 2000.

T. G. Crainic et B. Montreuil, “Physical internet enabled hyperconnected city logistics”, *Transportation Research Procedia*, vol. 12, pp. 383–398, 2016.

- T. G. Crainic et A. Sgalambro, “Service network design models for two-tier city logistics”, *Optimization Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 1375–1387, 2014.
- T. G. Crainic, K. H. Kim *et al.*, “Intermodal transportation”, *Transportation*, vol. 14, pp. 467–537, 2006.
- T. G. Crainic, F. Errico, W. Rei, et N. Ricciardi, “Modeling demand uncertainty in two-tier city logistics tactical planning”, *Transportation Science*, vol. 50, no. 2, pp. 559–578, 2015.
- T. Crainic, “City logistics”, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d’entreprise, la logistique et le transport, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada, Publication CRT-2008-25, 2008.
- T.G. Crainic et A. Sgalambro, “Service network design models for two-tier city logistics”, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d’entreprise, la logistique et le transport, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada, Publication CIRRELT-2009-60, 2009.
- T.G. Crainic, N. Ricciardi, et G. Storchi, “Advanced freight transportation systems for congested urban areas”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 12, no. 2, pp. 119–137, 2004.
- T.G. Crainic, N. Ricciardi, et Storchi, “Models for evaluating and planning city logistics transportation systems”, *Transportation Science*, vol. 43, no. 4, pp. 432–454, 2009.
- T.G.. Crainic, F. Errico, W. Rei, et N. Ricciardi, “Modeling demand uncertainty in two-tiered city logistics planning”, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d’entreprise, la logistique et le transport, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada, Publication CIRRELT-20-54, 2011.
- Crainic, T.G. et Laporte, G., “Planning models for freight transportation”, *European Journal of Operational Research*, vol. 97, no. 3, pp. 409–438, 1997.
- L. Dablanc, “Goods transport in large european cities: Difficult to organize, difficult to modernize”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 41, no. 3, pp. 280–285, 2007.

J. H. Dyer et H. Singh, “The relational view: Cooperative strategy and sources of interorganizational competitive advantage”, *Academy of management review*, vol. 23, no. 4, pp. 660–679, 1998.

P. Fontaine, T. G. Crainic, O. Jabali, et W. Rei, “Multi-modal scheduled service network design with resource management for two-tier city logistics”, dans *Publication*. Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d’entreprise, la logistique et le transport, Université de Montréal Montréal, QC, Canada, 2017.

J. Gonzalez-Feliu et J.-M. Salanova, “Defining and evaluating collaborative urban freight transportation systems”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 39, pp. 172–183, 2012.

J. Gonzalez-Feliu, J. Morana, J.-M. S. Grau, et T.-Y. Ma, “Design and scenario assessment for collaborative logistics and freight transport systems”, *International Journal of Transport Economics*, pp. 207–240, 2013.

A. Huart, “Optimisation de ressources en logistique urbaine”, Thèse de doctorat, Valenciennes, 2011.

D. M. Lambert, M. A. Emmelhainz, et J. T. Gardner, “Developing and implementing supply chain partnerships”, *The international Journal of Logistics management*, vol. 7, no. 2, pp. 1–18, 1996.

D. R. McDERMOTT, “An alternative framework for urban goods distribution: consolidation”, *Transportation Journal*, pp. 29–39, 1975.

A. McKinnon, “Urban transshipment international review of urban transshipment studies and initiatives”, 1998.

Montreuil, “Physical internet manifesto”, vol. 1, pp. 2010–04, 2012.

B. Montreuil, “Toward a physical internet: meeting the global logistics sustainability challenge”, *Logistics Research*, vol. 3, no. 2-3, pp. 71–87, 2011.

B. Montreuil, *Physical Internet Manifesto: globally transforming the way physical objects are handled, moved, stored, realized, supplied and used*.

[www.physicalInternetInitiative.org](http://www.physicalInternetInitiative.org), 2009.

B. Montreuil, E. Ballot, et F. Fontane, “An open logistics interconnection model for the physical internet”, *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 6, pp. 327–332, 2012.

B. Montreuil, R. D. Meller, et E. Ballot, “Physical internet foundations”, dans *Service orientation in holonic and multi agent manufacturing and robotics*. Springer, 2013, pp. 151–166.

J. Muñuzuri, J. Larrañeta, L. Onieva, et P. Cortés, “Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement”, *Cities*, vol. 22, no. 1, pp. 15–28, 2005.

L. Okdinawati, T. M. Simatupang, et Y. Sunitiyoso, “Modelling collaborative transportation management: Current state and opportunities for future research”, *JOSCM: Journal of Operations and Supply Chain Management*, vol. 8, no. 2, p. 96, 2015.

A. Rusich, “Collaborative logistics networks”, Thèse de doctorat, Trieste, 2017.

R. Sarraj, E. Ballot, S. Pan, et B. Montreuil, “Analogies between internet network and logistics service networks: challenges involved in the interconnection”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1–13, 2012.

R. Sarraj, E. Ballot, S. Pan, D. Hakimi, et B. Montreuil, “Interconnected logistic networks and protocols: simulation-based efficiency assessment”, *International Journal of Production Research*, vol. 52, no. 11, pp. 3185–3208, 2014.

S. Schrenk, “Contributions à la conception de réseau de service en transport”, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.

E. Taniguchi et R.G. Thompson, “Modeling city logistics”, *Transportation Research Record*, vol. 1790, pp. 45–51, 2002.

E. Taniguchi, R.G. Thompson, T. Yamada, et J.H.R. van Duin, *City Logistics: Network Modelling and Intelligent Transport Systems*. Pergamon, Amsterdam, 2001.

E. Taniguchi, T. Yamada, et M. Tamaishi, “Dynamic vehicle routing and scheduling with real time informations”, dans *City Logistics II, Second International Conference on City Logistics*, Taniguchi, E. et Thompson, R.G., édés. Institute of Systems Science Research, Kyoto, 2001, pp. 111–125.

E. Taniguchi, “Concepts of city logistics for sustainable and liveable cities”, *Procedia-social and behavioral sciences*, vol. 151, pp. 310–317, 2014.

N. Unies, *World urbanization prospects: the 2003 revision*. UN, 2004.

T. Van Rooijen et H. Quak, “Local impacts of a new urban consolidation centre—the case of binnenstadservice.nl”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 2, no. 3, pp. 5967–5979, 2010.

J. Visser, A. Van Binsbergen, et T. Nemoto, “Urban freight transport policy and planning”, *City logistics I*, pp. 39–69, 1999.

X. Xu, “Collaboration mechanism in the horizontal logistics collaboration”, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013.

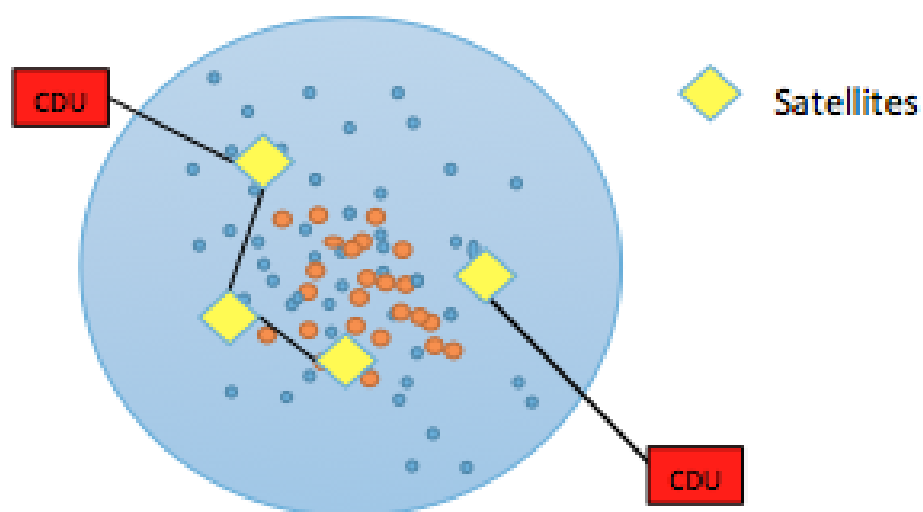
**ANNEXE A    RÉSEAU N4: 4 SATELLITES / 2 LIGNES DE TRAM**

Figure A.1 Réseau N4: 4 satellites / 2 lignes de tram



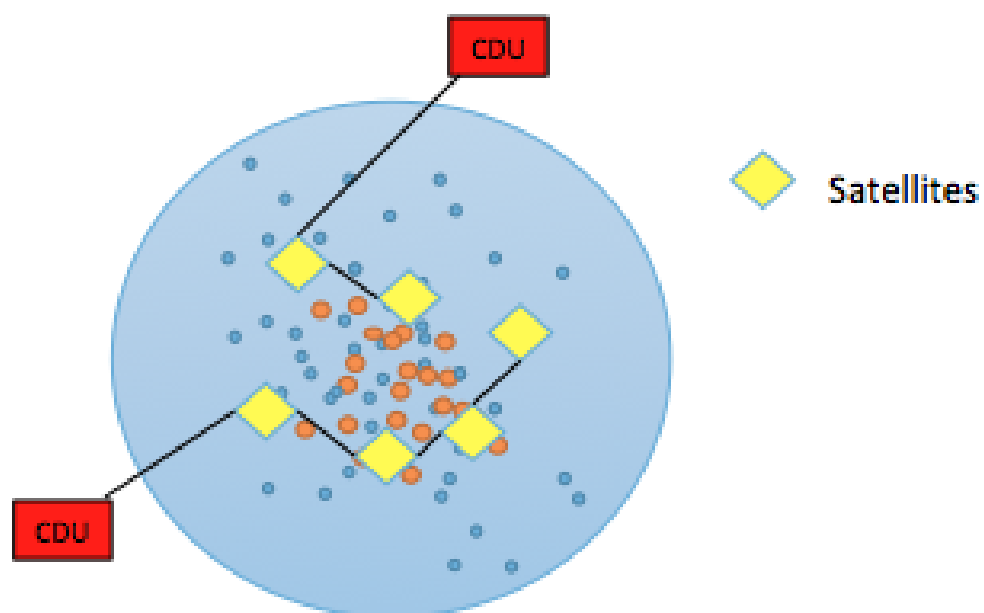
**ANNEXE B    RÉSEAU N6: 6 SATELLITES / 2 LIGNES DE TRAM**

Figure B.1 Réseau N6: 6 satellites / 2 lignes de tram

## ANNEXE C RÉSEAU N8-1: 8 SATELLITES / 2 LIGNES DE TRAM

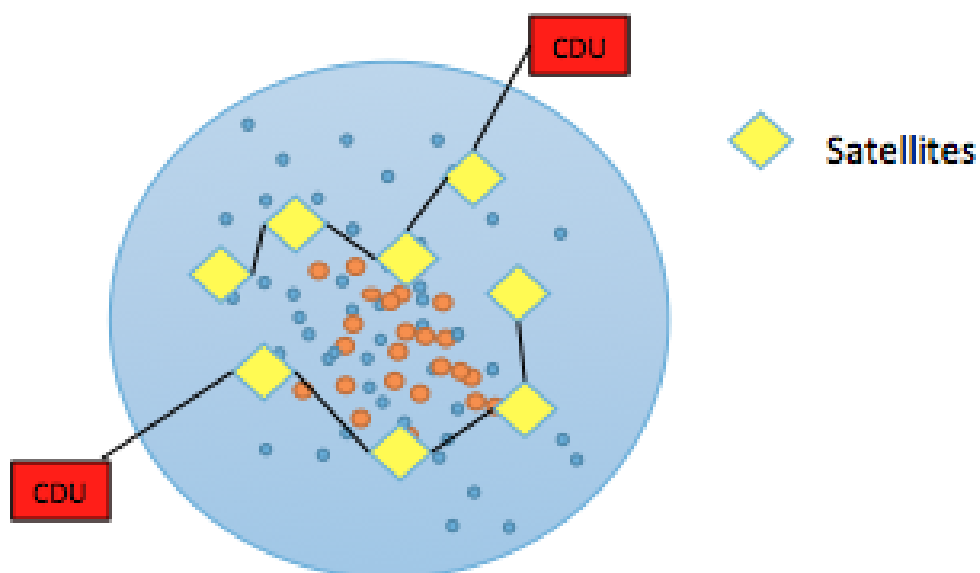


Figure C.1 Réseau N8-1: 8 satellites / 2 lignes de tram

## ANNEXE D RÉSEAU N8-2: 8 SATELLITES / 1 LIGNES DE TRAM

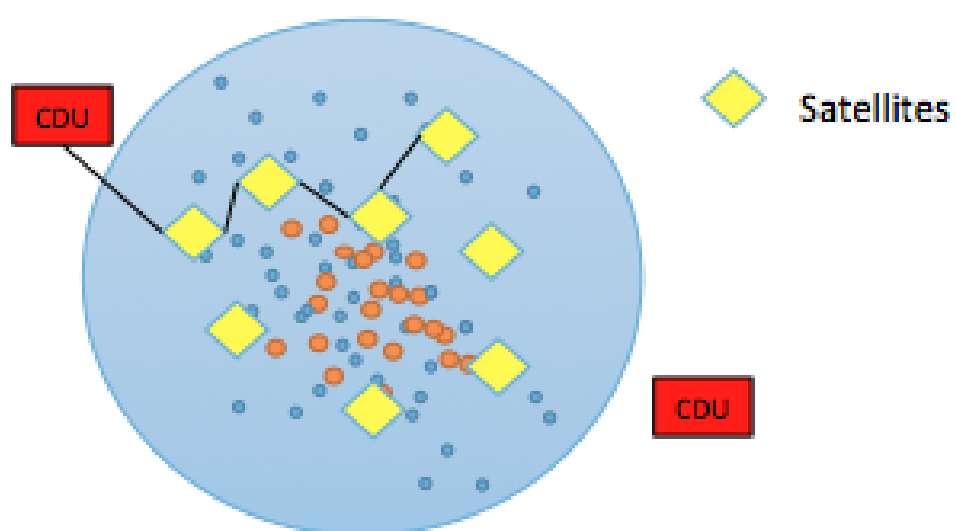


Figure D.1 Réseau N8-2: 8 satellites / 1 lignes de tram